

Волошенко А.В.

ТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРИБОРЫ
(курс лекций)

2009

ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Измерение – нахождение значения физической величины опытным путем, с помощью специальных технических средств.

Теплотехнические измерения служат для определения многих физических величин, связанных с процессами выработки и потребления тепловой энергии. Они включают определение число чисто тепловых величин (температура, тепловая энергия) и некоторые другие величины (давление, расход, количество, уровень, состав газа, концентрация). В энергетической промышленности теплотехнические измерения используются для повседневного контроля и наблюдения за работой и состоянием установленного на электростанциях оборудования. Большую роль технические измерения играют в устройствах автоматизации электрических станций (автоматическое регулирование и управление, технологическая защита, сигнализация).

Надежность и экономичная эксплуатация современных тепловых электростанций и малых котельных немыслима без применения значительного количества разнообразного по устройству, назначению и принципу действия приборов теплотехнического контроля.

Большинство современных теплотехнических приборов основано на применении электрических принципов измерения неэлектрических величин. Указанный принцип измерения, построенный на количественном соотношении между электрическими и неэлектрическими величинами, повышает точность и надежность измерений, упрощает устройство приборов и обеспечивает возможность передачи информации об измеряемом параметре на большие расстояния. Пневматические измерительные приборы применяют на взрывоопасных объектах.

Широкое применение для теплотехнических измерений получили автоматические электронные измерительные приборы, отличающиеся высокой точностью, чувствительностью и быстродействием.

Существуют следующие измерительные приборы, предназначенные для измерения теплотехнических параметров:

- температуры – термометры, пирометры;
- давления – манометры, вакуумметры, мановакуумметры, напоромеры, тягомеры, тягонапоромеры и барометры;
- расхода и количества – расходомеры, счетчики;
- уровня жидкости и сыпучих тел – уровнемеры, указатели уровня;
- состав дымовых газов – газоанализаторы;
- качество воды и пара – кондуктометры.

Теплотехнические измерения являются составной частью такой большой науки, как метрология.

2. ИЗМЕРЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

2.1. ПОНЯТИЕ О ТЕМПЕРАТУРЕ И ТЕМПЕРАТУРНЫХ ШКАЛАХ

Температура – условная статистическая величина, прямо пропорциональная средней кинетической энергии частиц вещества (молекул или атомов), так как согласно кинетической теории, температуру определяют как меру кинетической энергии поступательного движения молекул.

$$E = \frac{3}{2} \cdot kT,$$

где E – кинетическая энергия поступательного движения молекул,
 k – постоянная Больцмана,
 T – температура газа.

Измерение температуры на практике возможно лишь методом сравнения нагретости двух тел, причем степень нагретости одного из них предполагается известной. Для этого используют изменение, какого-либо физического свойства вещества, зависящего от температуры и легко поддающегося измерению, т.е. измерение температуры производится косвенным методом.

Температурная шкала – непрерывная совокупность чисел, линейно связанных с численными значениями какого-либо удобно и достаточно точно измеряемого физического свойства вещества; представляющего собой однозначную и монотонную функцию температуры.

Чтобы перейти к количественной оценке температуры, необходимо установить шкалу температур, т.е. выбрать начало отсчета и единицу измерения температур.

Для разметки температурной шкалы чаще всего использовали объемное расширение тел при нагревании, а за постоянные точки принимали температуру кипения воды t_2 и температуру таяния льда t_1 . На этом принципе основаны шкалы созданные Фаренгейтом, Реомюром, Цельсием и Ломоносовым. Авторы приняли температуру таяния льда t_1 и температуру кипения воды t_2 , соответственно:

$$t_1 = +32^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C}, 0^\circ\text{C};$$

$$t_2 = 180^\circ\text{C}, 80^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C}, 100^\circ\text{C}.$$

Соотношение между единицами измерения температуры следующее:

$$t^\circ\text{C} = 1,25^\circ\text{R} = \frac{5}{9}(\text{ }^\circ\text{F} - 32).$$

При построении этих шкал условно была принята линейная зависимость между объемным расширением жидкости V и температурой t , т.е.

$$dt = k \cdot dV, \tag{2.1}$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Проинтегрировав это уравнение, получим:

$$t = k \cdot V + C, \quad (2.2)$$

где C – постоянная интегрирования.

Для определения k и C используются две выбранные температуры t_1 и t_2 . Приняв при температуре t_1 объем V_1 , а при температуре t_2 объем V_2 , получим:

$$t_1 = k \cdot V_1 + C, \quad (2.3)$$

$$t_2 = k \cdot V_2 + C \quad (2.4)$$

Вычитая из уравнения (2.3) уравнение (2.2), а из уравнения (2.4) уравнение (2.3), получим:

$$t_1 - t = k \cdot (V_1 - V), \quad (2.5)$$

$$t_2 - t_1 = k \cdot (V_2 - V_1). \quad (2.6)$$

Поделив уравнение (2.6) на уравнение (2.5) и выполнив преобразование, получим:

$$t = t_1 + \frac{V - V_1}{V_2 - V_1} \cdot (t_2 - t_1), \quad (2.7)$$

где t_1, t_2 – температуры таянья льда и кипения воды, при нормальном давлении ($P = 760$ мм рт. ст.) и ускорении свободного падения ($g = 9,80665$ м/с²);

V_1, V_2 – объемы жидкости, соответствующие температурам t_1 и t_2 ;

t – значение температуры, которому соответствует объем жидкости V .

Уравнение (2.7) можно назвать уравнением шкалы температур Цельсия.

В природе не существует жидкостей со строго линейной зависимостью между объемным расширением и температурой, поэтому показания термометров зависят от природы термометрического вещества (ртути, спирта и т.д.).

С развитием науки и техники возникла необходимость в создании единой температурной шкалы, не связанной с какими-либо частными свойствами термометрического вещества и пригодной в широком интервале температур.

Исходя из второго закона термодинамики, Кельвин в 1848 году предложил определять температуру на основании равенства

$$\frac{T_2}{T_2 - T_1} = \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1},$$

где T_1, T_2 – температуры соответственно холодильника и нагревателя, Q_1, Q_2 – количество теплоты, соответственно полученной рабочим веществом от нагревателя и отданной холодильнику (для идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно).

Пусть T_2 равна температуре кипения воды (T_{100}), а T_1 – температуре таяния льда (T_0), тогда $T_{100} - T_0 = 100$. Обозначим количество тепла соответственно этим температурам через Q_{100} и Q_0 . Тогда получим:

$$T_{100} = \frac{Q_{100}}{Q_{100} - Q_0} \cdot 100; \quad T_0 = \frac{Q_0}{Q_{100} - Q_0} \cdot 100.$$

Для любой температуры нагревателя уравнение термодинамической шкалы будет иметь вид

$$T = \frac{Q_0}{Q_{100} - Q_0} \cdot 100.$$

Решением XI–ой генеральной конференции по мерам и весам было предусмотрено применение двух температурных шкал – термодинамической и международной практической.

Термодинамическая шкала называется абсолютной, если в ней за нуль принять точку, которая лежит на $273,16$ °С ниже точки плавления льда. Осуществить шкалу Кельвина невозможно, т.к. уравнение выведено из идеального цикла Карно. Однако термодинамическая шкала температур совпадает со шкалой газового термометра, заполненного идеальным газом. Известно, что некоторые реальные газы (водород, гелий, неон, азот) в широком интервале температур по своим свойствам значительно отличаются от идеального газа. Так, например, шкала водородного термометра, с учетом поправки на отклонение водорода от идеального газа, представляет собой практически термодинамическую шкалу температур.

Газовые термометры очень точные приборы (погрешность их составляет $3 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-2}$ К), но работать с ними очень сложно, и узок диапазон измеряемых температур, поэтому для промышленных измерений их применять нельзя.

В 1967 году Международный комитет мер и весов в соответствии с решением XIII Генеральной конференции по мерам и весам принял новую Международную практическую шкалу МПТШ-68. Она базируется на ряде воспроизводимых равновесных состояний, которым присвоены точные значения температур, т.е. на одиннадцати основных реперных (постоянных) точках. Но в связи с уточнением значения температуры кипения воды (принятая $t_2 = 100$ °С, уточненная $t_2 = 99,974$ °С) с 1.01.90 года была введена новая Международная шкала температур МШТ-90.

В настоящее время человечество способно измерять температуру от $0,01$ К до 100000 К (от $-273,15$ °С до $99726,85$ °С). В диапазоне температур от $0,01$ К до $13,81$ К используются четыре практических температурных шкалы, а в диапазоне $13,81$ К до 6300 К используется МШТ-90, с 6300 К – космическое измерение температур (такие значения температур в промышленности не встречаются).

Значения температуры между постоянными точками МШТ-90 получают по интерполяционным уравнениям, а измерения производят с помощью эталонных приборов. В качестве эталонных приборов для реализации МШТ-90 в диапазоне от $-259,23\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $630,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ используется платиновый термопреобразователь сопротивления, в диапазоне от $630,74\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ используется платинородий-платиновый термоэлектрический преобразователь, в диапазоне от $1064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $6026,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ используется квазимонохроматический пирометр.

2.2. УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

В практике существует большое количество разнообразных устройств предназначенных для измерения температуры твердых, жидких и газообразных сред, использующих различные термометрические свойства (табл. 2.1) и носящих название термометр.

Таблица 2.1
Промышленные устройства измерения температуры

Термометрическое свойство	Наименование устройства	Измерительный прибор	Диапазон измерения, $^{\circ}\text{C}$	
			Нижний	Верхний
Тепловое расширение	Термометры: жидкостные стеклянные дилатометрические биметаллические	—	-200	600
			0	400
			-60	300
Изменение давления в замкнутом объеме	Манометрические термометры (со спецнаполнителем)	—	-200	600 (1000)
Термоэлектрический эффект	Термоэлектрические преобразователи	Автоматический потенциометр, пирометрический милливольтметр	-200	2500
Изменение электрического сопротивления	Термопреобразователи сопротивления (по заказу)	Автоматический мост, логометр	-260	850 (1100)
Тепловое излучение	Пирометры: оптические радиационные	— Автоматический потенциометр, пирометрический милливольтметр	700	6000
			30	3500

Термометр – устройство, предназначенное для измерения температуры путем преобразования ее в показания или в сигнал, который в свою очередь является известной функцией температуры.

Чувствительным элементом термометра называется его часть, которая преобразует тепловую энергию в другой вид энергии для получения информации о температуре.

Различают два вида термометров. Контактные – это термометры, чувствительный элемент которых входит в непосредственное соприкосновение с измеряемой средой и бесконтактные, чувствительный элемент которых не имеет непосредственного соприкосновения с измеряемой средой. Такие термометры называют пирометрами.

2.3. ЖИДКОСТНЫЕ СТЕКЛЯННЫЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Принцип действия жидкостных стеклянных термометров (ЖСТ) основан, на физическом свойстве тел изменять свой объем в зависимости от нагрева, и на различии коэффициентов объемного расширения жидкости $\alpha_{ж}$ и термометрического стекла α_c .

Тепловое расширение жидкости характеризуется средним коэффициентом объемного расширения жидкости, значение которого определяется соотношением

$$\alpha_{ж} = \frac{V_2 - V_1}{V_0 \cdot (t_2 - t_1)}, \quad (2.8)$$

где V_1 , V_2 , V_0 – объемы жидкости при температурах t_1 , t_2 и 0 °С, $t_1 > t_2$.

Приращение в капилляре термометра столбика жидкости Δh при нагреве резервуара от t_1 до t_2 определяется по формуле

$$\Delta h = 1.275 \cdot \frac{V_1 (\alpha_{ж} - \alpha_c) \cdot (t_2 - t_1)}{d^2}, \quad (2.9)$$

где V_1 – объем жидкости при температуре t_1 в мм³,

d – внутренний диаметр капилляра в мм.

Разность коэффициентов объемного расширения жидкости $\alpha_{ж}$ и термометрического стекла α_c в уравнении 2.9 представляет собой средний температурный коэффициент видимого расширения жидкости в стекле, т.е.

$$\alpha_B = \alpha_{ж} - \alpha_c. \quad (2.10)$$

Для изготовления термометров применяются термометрические сорта стекол с малым коэффициентом расширения $\alpha_c \approx 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

В качестве термометрической жидкости применяются вещества, перечисленные в табл. 2.2.

Таблица 2.2
Характеристики термометрических жидкостей

Термометрическое вещество	$\alpha_{ж}, K^{-1}$	Предел измерения, °C
Ртуть	$\sim 16 \cdot 10^{-5}$	$-35 \div 600$
Спирт метиловый	$\sim 115 \cdot 10^{-5}$	$-80 \div 80$
Спирт этиловый	$\sim 103 \cdot 10^{-5}$	$-80 \div 80$
Керосин	$\sim 93 \cdot 10^{-5}$	$0 \div 300$
Пентан	$\sim 170 \cdot 10^{-5}$	$-190 \div 20$

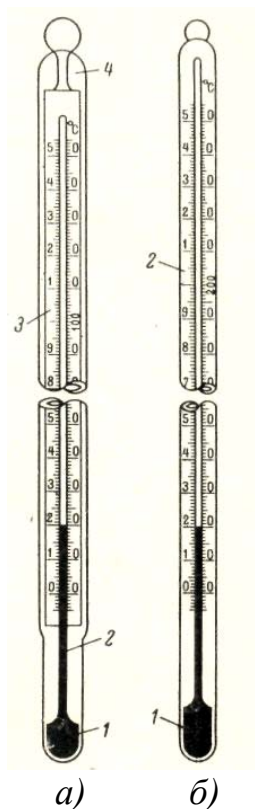


Рис. 2.1. ЖСТ:
а) – с вложенной шкалой;
б) – палочный

Ртуть не смачивает стекло, практически не окисляется, легко получается в химически чистом виде, имеет значительный интервал между точкой плавления ($-38,86 \text{ } ^\circ\text{C}$) и точкой кипения ($356,6 \text{ } ^\circ\text{C}$). Верхний предел ртутных термометров можно расширять для технических термометров до $500 \text{ } ^\circ\text{C}$, для образцовых термометров до $600 \text{ } ^\circ\text{C}$. Это возможно за счет заполнения верхней части капилляра инертным газом под давлением до 2 МПа.

ЖСТ выпускают двух видов палочные и с вложенной шкалой.

Палочные термометры имеют толстостенный капилляр 2, нижний конец которого образует резервуар 1. Шкала нанесена на внешней поверхности капилляра.

ЖСТ с вложенной шкалой имеют тонкостенный капилляр с расширенным резервуаром для термометрической жидкости. Шкала наносится на пластинку из молочного стекла 3, которая вместе с капилляром 2 помещается в стеклянную оболочку 4, приклеенную к резервуару термометра 1. Технические термометры изготавливаются только с вложенной шкалой.

Заводы выпускают следующие разновидности термометров:

- технические ртутные со вложенной шкалой; при погружении в измеряемую среду нижней части термометра, прямые и угловые (90° и 135°) со шкалами $-35 \div 50^\circ\text{C}$ и $0 \div 50, 100, 150, \dots, 500^\circ\text{C}$; с ценой деления до $50^\circ\text{C} - 0,5^\circ\text{C}$ и 1°C , постепенно возрастающей до 5°C и 10°C ;
- технические не ртутные термометры, выпускаются в различном конструктивном исполнении, в том числе и с прикладной шкалой;
- электроконтактные ртутные с вложенной шкалой, с впаянными в капиллярную трубку контактами для замыкания столбиком ртути элек-

трической цепи, или с подвижным сигнальным контактом с верхним пределом до 300 °С;

- специальные термометры (медицинские, метеорологические и т.п.);
- лабораторные ртутные палочные и с вложенной шкалой, погружаемые в измеряемую среду до отсчитываемой отметки, с ценой деления 0,1 °С;
- термометры повышенной точности и эталонные ртутные термометры с верхним пределом измерения до 600 °С и ценой деления 0,01 °С.

Предел допускаемой основной абсолютной погрешности технического термометра не должен превышать цены деления шкалы. Например, для термометра с ценой деления 1 °С с диапазоном измерения 0÷100 °С предел допускаемой основной абсолютной погрешности равен $\Delta_{\partial} = \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Для остальных ЖСТ допускаемые погрешности при одной и той же цене деления устанавливаются различными для различных температурных интервалов. Например: при цене деления 0,1 °С для интервала температур 0÷50 °С предел допускаемой основной абсолютной погрешности равен $\Delta_{\partial} = \pm 0,2^{\circ}\text{C}$, а для интервала температур 250÷300 °С при той же цене деления $\Delta_{\partial} = \pm 0,8^{\circ}\text{C}$.

Проверка показаний термометров производится методом сличения с эталонными приборами более высокого класса точности. В качестве рабочего эталона можно использовать лабораторные термометры с ценой деления 0,1 °С, а нагрев термометров производить в термостатах. Для температур $-80 \div -1^{\circ}\text{C}$ используется криостат, который заполняется этиловым спиртом или другой незамерзающей жидкостью; для 0 °С – нулевой термостат заполненный смесью льда с водой; для $+1 \div 100^{\circ}\text{C}$ – водяной термостат; для $+95 \div 300^{\circ}\text{C}$ – масляный термостат; для $+300 \div 600^{\circ}\text{C}$ – солевой термостат. Все вышеперечисленное оборудование, применяемое для проверки термометров, можно заменить калибратором температуры.

2. 4. МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕРМОМЕТРЫ

Принцип действия манометрических термометров (МТ) основан на использовании зависимости между температурой и давлением термометрического вещества в замкнутой герметичной термосистеме.

Герметичная термосистема (рис. 2.2, а), заполненная термометрическим веществом, состоит из термобаллона 1, капилляра 2 и манометрической трубки 3. Сечения манометрической трубки показаны на рис. 2.2 в и г. В зависимости от термометрического вещества термосистемы манометрические термометры подразделяются на газовые, жидкостные и конденсационные (парожидкостные).

При нагревании термобаллона давление рабочего вещества внутри замкнутой системы повышается, что приводит к перемещению свободного конца манометрической трубки. Движение с помощью зубчато-секторного механизма, который состоит из поводка 5, зубчатого сектора 6 и шестеренки 7 передается на стрелку 8. Противодействующая пружина 9 предназначена для ликвидации люфтов в зубчато-секторной паре. Термобаллон изготавливается из нержавеющей стали, а капилляр из меди или стали диаметром $0,15 \div 0,5$ мм и длиной $1 \div 60$ м. Капилляр от повреждений защищен металлрукавом.

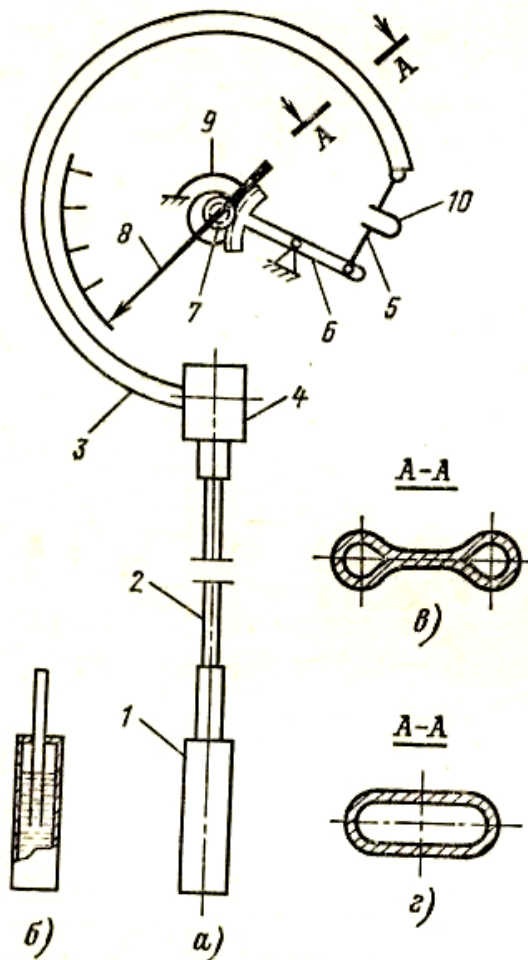


Рис. 2.2. Схема манометрического термометра

1 – термобаллон; 2 – капилляр; 3 – манометрическая трубка; 4 – штуцер;
5 – поводок; 6 – зубчатый сектор; 7 – шестеренка; 8 – стрелка;
9 – противодействующая пружина; 10 – термокомпенсатор

Газовые манометрические термометры позволяют измерять температуру в интервале $-200 \div 600$ °С. Термометрическое вещество – азот. При постоянном объеме газа зависимость давления в термосистеме от температуры измеряемой среды определяется линейным уравнением

$$P_t = P_0 \cdot (1 + \beta \cdot t), \quad (2.11)$$

где P_0 – давление газа при температуре 0 °С,

β – термический коэффициент давления газа.

При изменении температуры газа в термосистеме от начальной температуры до конечной температуры давление газа будет изменяться в соответствии с уравнением

$$P_K = P_H \cdot \frac{1 + \beta \cdot t_K}{1 + \beta \cdot t_H}, \quad (2.12)$$

где P_H, P_K – давление газа при температуре, соответствующих началу t_H

и концу t_K шкалы манометрического термометра.

Вычитая и прибавляя к правой части уравнения (2.12) значение $P_H \beta t_H$, и преобразовав его получим уравнение шкалы газового манометрического термометра

$$\Delta P = P_K - P_H = \frac{P_H \cdot \beta \cdot (t_K - t_H)}{1 + \beta \cdot t_H}. \quad (2.13)$$

Из уравнения 2.16 видно, что значение рабочего давления ΔP в термосистеме газового термометра прямо пропорционально значению начального давления P_H и диапазону измерения ($t_H - t_K$) прибора. Шкала газового манометрического термометра линейна.

Для ликвидации влияния атмосферного давления на показания манометрического термометра и увеличения рабочего давления, термосистему заполняют под некоторым начальным давлением P_H , значение которого зависит от диапазона измерения. Например, для манометрического термометра с диапазоном измерения $0 \div 100$ °С $P_H = 3,8$ МПа, а с диапазоном измерения $0 \div 600$ °С $P_H = 1,5$ МПа.

Для понижения температурной погрешности (от влияния температуры окружающей среды) в поводок устанавливается биметаллический термокомпенсатор 10.

Типы газовых манометрических термометров ТГП – термометр газовый показывающий; ТГС – термометр газовый сигнализирующий. Классы точности $K = 1; 1,5$.

Жидкостные манометрические термометры позволяют измерить температуру в интервале $-150 \div 300$ °С. Рабочее вещество – спирт пропиловый, метаксиллол. При нагреве термобаллона от t_H до t_K жидкость начинает расширяться и термобаллон увеличивает свой объем. Вследствие этого из него будет вытесняться рабочая жидкость объемом

$$\Delta V = V \cdot (\beta - 3 \cdot \alpha) \cdot (t_K - t_H), \quad (2.14)$$

где V – внутренний объем термобаллона,

β – объемный коэффициент расширения жидкости,

α – коэффициент линейного расширения материала термобаллона.

Из уравнения (2.17) видно, что изменение V жидкости при нагревании является линейной функцией температуры, поэтому шкала жидкостных манометрических термометров равномерная.

Для предохранения жидкости от закипания в термосистеме обеспечивается начальное давление порядка $1,5 \div 2$ МПа откуда следует, что и атмосферное давление не влияет на показания жидкостных манометрических термометров.

Типы жидкостных манометрических термометров ТЖП – термометр жидкостной показывающий; ТЖС – термометр жидкостной сигнализирующий. Классы точности $K = 1; 1,5; 2,5$.

Конденсационные манометрические термометры позволяют измерить температуру в интервале $-50 \div 300$ °С. Рабочее вещество – ацетон, фреон-22, хлористый метил и другие низкокипящие жидкости.

Термобаллон конденсационного манометрического термометра на $2/3 \div 3/4$ заполнен низкокипящей жидкостью (рис. 2.2, б), над которой образуется пар. Капилляр и манометрическая трубка заполнены этой же жидкостью. Давление в термосистеме зависит от давления пара в термобаллоне. Шкала конденсационных манометрических термометров неравномерная.

Типы конденсационных манометрических термометров ТКП – термометр конденсационный показывающий; ТКП 100Сг – термометр конденсационный показывающий и сигнализирующий. Классы точности $K = 1,5; 2,5; 4$.

Проверка показаний манометрических термометров производится методом сличения с использованием того же оборудования, что и при проверке ЖСТ.

2.5. ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Термоэлектрический преобразователь (ТЭП) – это первичный измерительный преобразователь температуры, в котором выходная величина формируется под воздействием термоэлектрического эффекта, и представляет собой механически прочную конструкцию удобную для монтажа.

Чувствительным элементом ТЭП является термопара, которая представляет собой термоэлектрическую цепь, состоящую из двух спаянных между собой разнородных проводника (рис.2.3).

Принцип действия термопары основан на термоэлектрическом эффекте, который заключается в том, что в замкнутой цепи состоящей из двух или нескольких разнородных проводников возникает электрический ток, если хотя бы два места соединения (спая) проводников имеют разную температуру (основан на разности температур двух сред).

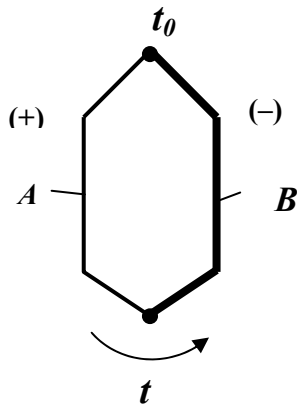


Рис. 2.3. Термоэлектрическая цепь

Конец термопары с температурой t называется горячим или рабочим, а конец с температурой t_0 – холодным или свободным ($t > t_0$). Проводники A и B называются термоэлектродами.

Термоэлектрический эффект объясняется наличием в металлах свободных электронов, число которых в единице объема для различных металлов различно.

Предположим, что на свободном конце термопары электроны из металла A диффундируют в металл B в большем количестве, чем в обратном направлении, поэтому металл A заряжается положительно (+), а металл B – отрицательно (-). Электрическое поле, возникающее в месте соединения проводников, препятствует этой диффузии. Когда скорость диффузии электронов станет равной скорости их обратного перехода, под влиянием установившегося электрического поля наступит состояние подвижного равновесия. При таком состоянии между проводниками A и B возникает некоторая разность потенциалов, которая называется ТЭДС.

Результирующая ТЭДС цепи, состоящей из разнородных по составу проводников A и B , но однородных по длине равна:

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BA}(t_0), \quad (2.15)$$

где $e_{AB}(t)$, $e_{BA}(t_0)$ – ТЭДС, обусловленные контактной разностью потенциалов и разностью температур концов термопары A и B .

Если $t = t_0$, то

$$E_{AB}(t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BA}(t_0) = 0,$$

$$e_{AB}(t_0) = -e_{BA}(t_0).$$

Перепишем уравнение (2.15) с учетом полученного равенства

$$E_{AB}(t, t_0) = e_{AB}(t) + e_{AB}(t_0). \quad (2.16)$$

Уравнение (2.16) называют уравнением термопары.

Из уравнения (2.16) следует, что ТЭДС представляет собой сложную функцию двух переменных величин t и t_0 . Поддерживая температуру холодных концов термопары постоянной, получим:

$$E_{AB}(t, t_0) = f(t). \quad (2.17)$$

Зависимость (2.17) называют номинальной статической характеристикой преобразования (НСХ).

Если для конкретной термопары экспериментально, т.е. путем градуировки будет найдена зависимость (2.17), то измерение температуры будет сводиться к определению ТЭДС.

К эксперименту приходится прибегать потому, что электронная теория дает лишь физическое (качественное) объяснение термоэлектрического эффекта, в то время как количественному учету свободные электроны не поддаются.

2.6. ВКЛЮЧЕНИЕ ТРЕТЬЕГО ПРОВОДНИКА В ЦЕПЬ ТЕРМОПАРЫ

Для измерения возникающей ТЭДС в цепь термопары необходимо включить измерительный прибор. Для начала разорвем холодный спай термопары, включим в него 3-й проводник C и проверим как он повлияет на результирующую ТЭДС (рис.2.4).

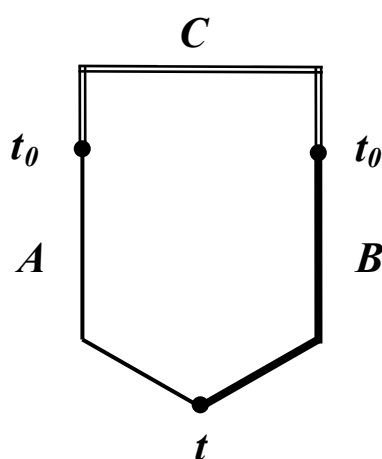


Рис. 2.4. Схема включения третьего проводника в термоэлектрическую цепь

ТЭДС этой цепи (рис. 2.4) равна:

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = e_{AB}(t) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0). \quad (2.18)$$

Предположим, что $t = t_0$, тогда:

$$E_{ABC}(t_0) = e_{AB}(t_0) + e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = 0. \quad (2.19)$$

Откуда:

$$e_{BC}(t_0) + e_{CA}(t_0) = -e_{AB}(t_0).$$

Запишем уравнение (2.18) с учетом полученного равенства

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = e_{AB}(t) - e_{AB}(t_0). \quad (2.20)$$

Следовательно,

$$E_{ABC}(t, t_0, t_0) = E_{AB}(t, t_0). \quad (2.21)$$

Из уравнения (2.21) следует, что ТЭДС термопары не изменится от введения в ее цепь третьего проводника, если холодные концы термопары будут иметь одинаковую температуру. Практически это означает, что в цепь можно подключать соединительные провода и измерительный прибор.

2.7. ПОПРАВКА НА ТЕМПЕРАТУРУ ХОЛОДНЫХ КОНЦОВ ТЕРМОПАРЫ

Выше установлено, что ТЭДС термопары является функцией измеряемой температуры при условии, что $t_0 = \text{const}$. Термопары градуируются при $t_0 = 0^\circ\text{C}$. При измерениях соблюсти данное условие невозможно. В этом случае необходимо вводить поправку на температуру холодных концов термопары (t_0). Если $t'_0 > 0^\circ\text{C}$, то $E_{AB}(t, t'_0) < E_{AB}(t, 0^\circ\text{C})$. Разность этих ТЭДС и будет представлять поправку на t_0 . В общем виде значение действительной ТЭДС можно записать следующим образом:

$$E_{AB}(t, 0^\circ\text{C}) = E_{AB}(t, t'_0) \pm E_{AB}(t'_0, 0^\circ\text{C}), \quad (2.22)$$

где $E(t, t'_0)$ – измеренная ТЭДС,

$E(t'_0, 0^\circ\text{C})$ – поправка на температуру свободных концов термопары
(знак «+», если $t'_0 > 0^\circ\text{C}$, знак «-», если $t'_0 < 0^\circ\text{C}$).

Величину поправки, при известной температуре холодных концов, можно рассчитать по номинальной статической характеристике термопары, которая может быть предоставлена в виде таблицы или графика.

2.8. СТАНДАРТНЫЕ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Не каждая пара разнородных проводников пригодна для практического применения, поэтому современная техника предъявляет к материалам термоэлектродов следующие требования:

- устойчивость к воздействиям высоких температур;
- постоянство ТЭДС во времени;
- должна быть возможна большая величина ТЭДС;
- линейная и однозначная зависимость ТЭДС от температуры;
- небольшой температурный коэффициент и электрическое сопротивление, большая теплопроводность;

– воспроизводимость термоэлектрических свойств, обеспечивающих взаимозаменяемость термопар.

Всем указанным требованиям не удовлетворяет ни один из известных термоэлектродных материалов, поэтому на практике пользуются различными материалами в различных пределах измеряемых температур.

В России согласно ГОСТ Р 8.585-2001 – «Термопары. Номинальные статические характеристики преобразования» с 1.01.2001 разрешено изготовление и применение термопар десяти градуировок, технические характеристики которых приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Технические характеристики стандартных термопар

Тип ТЭП	Условные обозначения НСХ термопары		Материалы термоэлектродов		Диапазон измеряемых температур; °С	
	До 01.94	С 01.01	Положительный	Отрицательный	Длительно	Кратковрем.
ТВР	ВР(А)-1 ВР(А)-2 ВР(А)-3	А-1 А-2 А-3	Вольфрамрений Сплав ВР-5 (95%W +5% Re)	Вольфрамрений Сплав ВР-20 (80% W+20%Re)	0 ÷ 2200 0 ÷ 1800 0 ÷ 1800	2500
ТПР	ПР(В)	В	Платинородий Сплав ПР-30 (70%Pt+30% Rh)	Платинородий Сплав ПР-6 (94% Pt +6% Rh)	300 ÷ 1600	1800
ТПП	ПП(С) ПП(Р)	С R	Платинородий Сплав ПР – 10 (90%Pt+10% Rh) Сплав ПР – 13 (87%Pt+13% Rh)	ПлатинаПлТ (Pt)	0 ÷ 1300	1600
ТХА	ХА(К)	К	Хромель. Сплав никель – хром (90,5%Ni+9,5% Cr)	Алюмель. Сплав никель – алюми- ний (94,5% Ni +5.5%Al, Si, Mn, Co)	-200 ÷ 1000	1300
ТХКн	ХК(Е)	Е	Хромель	Константан Сплав(55%Cu, +45%Ni, Mn, Fe)	-200 ÷ 700	900
ТХК	ХК(Л)	Л	Хромель	Капель Сплав медно – никелевый (56% Cu +44% Ni)	-200 ÷ 600	800
ТНН	НН(Н)	Н	Никросил (84%Ni+16%Cr, Fe, Si, C, Mg)	Нисил (95%Ni +5%Cr, Si, Fe, C, Mg)	-270 ÷ 1300	1300
ТМК	МК(Т)	Т	Медь М1 (Cu)	Константан	-270 ÷ 350	400
ТЖК	ЖК(Ј)	Ј	Железо (Fe)	Константан	-200 ÷ 700	900

При массовом производстве ТЭП трудно располагать термоэлектродными материалами строго постоянного химического состава, поэтому для стандартных ТЭП в ГОСТе предусмотрены допускаемые отклонения (погрешности) ТЭДС термопар в температурном эквиваленте от номинального значения. Значения пределов допускаемых основных абсолютных погрешностей термопар приведены в табл. 2.4.

Таблица 2.4
Пределы допускаемых основных абсолютных погрешностей термопар

Тип ТЭП	НСХ	Класс допуска	Диапазон измерений, °С	Пределы допускаемых погрешностей, $\pm \Delta t_{\theta}$ °С
ТПП	S, R	2	0 ÷ 600	1,5
		1	Свыше 600 ÷ 1600 0 ÷ 1100 Свыше 1100 ÷ 1600	0,0025· <i>t</i> 1,0 1,0 + 0,003·(<i>t</i> – 1100)
ТХА ТНН	К	2	(–40) ÷ 334	2,5
		1	Свыше 334 ÷ 1300 (–40) ÷ 375 Свыше 375 ÷ 1300	0,0075· <i>t</i> 1,5 0,004· <i>t</i>
ТХК	L	3	(–200) ÷ (–100)	1,5 + 0,01· <i>t</i>
		2	(–100) ÷ 100 (–40) ÷ 300 Свыше 300 ÷ 800	2,5 2,5 0,7 + 0,005· <i>t</i>
ТХК _Н	E	2	(–40) ÷ 334	2,5
		1	Свыше 334 ÷ 900 (–40) ÷ 375 Свыше 375 ÷ 800	0,0075· <i>t</i> 1,5 0,004· <i>t</i>
ТВР	A	2	1000 ÷ 2500	0,005· <i>t</i>
ТПР	B	3	300 ÷ 800	4,0
		2	800 ÷ 1800 600 ÷ 1800	0,005· <i>t</i> 0,0025· <i>t</i>
ТМК	T	2	(–40) ÷ 135	1,0
		1	Свыше 135 ÷ 400 (–40) ÷ 125 Свыше 125 ÷ 350	0,0075· <i>t</i> 0,5 0,004· <i>t</i>
ТЖК	J	2	(–40) ÷ 334	2,5
		1	Свыше 334 ÷ 900 (–40) ÷ 375 Свыше 375 ÷ 750	0,0075· <i>t</i> 1,5 0,004· <i>t</i>

Примечания: 1. *t* – значение измеряемой температуры.

2. Предел допускаемых отклонений ТЭДС термопар ΔE_D рассчитывается по формуле:

$$\Delta E_{\text{д}} = \Delta t_{\text{д}} \cdot \left(\frac{\Delta E}{\Delta t} \right), \quad (2.23)$$

где $\Delta t_{\text{д}}$ – предел допускаемых отклонений в °С,
 $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ – чувствительность термопары, рассчитанная для измеряемого значения температуры.

Пределы допускаемых основных абсолютных погрешностей термопар в общем виде можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{д}} &= \pm a; \\ \Delta t_{\text{д}} &= \pm b \cdot t; \\ \Delta t_{\text{д}} &= \pm (c + d \cdot t). \end{aligned} \quad (2.24)$$

Зависимость ТЭДС от температуры рабочего конца при $t_0 = 0$ °С с интервалом в 1 °С приведена в ГОСТ Р 8.585-2001 и называется номинальной статической характеристикой преобразования. НСХ некоторых ТЭП приведены на рис. 2.5.

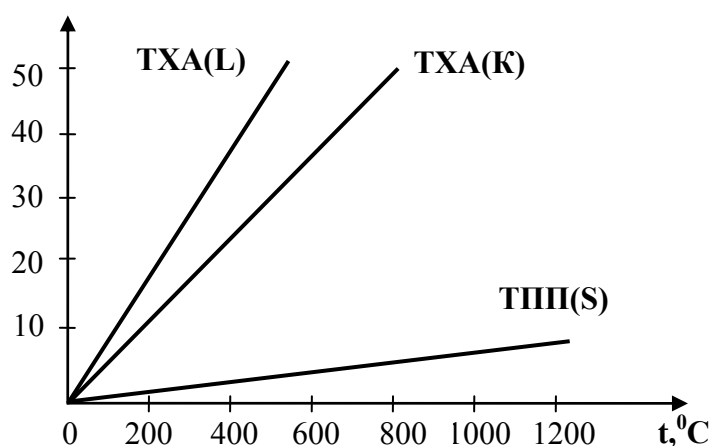


Рис. 2.5. НСХ ТЭП, т.е. зависимость ТЭДС от температуры при $t_0 = 0$ °С

КОНСТРУКЦИИ И ПОВЕРКА ТЭП

По способу контакта с измеряемой средой ТЭП могут быть поверхностными и погружаемыми. Длина ТЭП находится в интервале от 60 мм до 3,2 м (кабельных ТЭП до 25 м). Диаметр ТЭП 0,5 мм ÷ 20 мм.

Конструктивное оформление ТЭП разнообразно и зависит от условий их применения. Независимо от конструкции ТЭП должны удовлетворять следующим требованиям:

- изоляция термоэлектродов должна исключать возможность короткого замыкания и электрических утечек;
- термоэлектроды должны быть защищены от механических повреждений и химических воздействий измеряемой среды;
- ТЭП должны иметь в целом механически прочную конструкцию, удобную для монтажа.

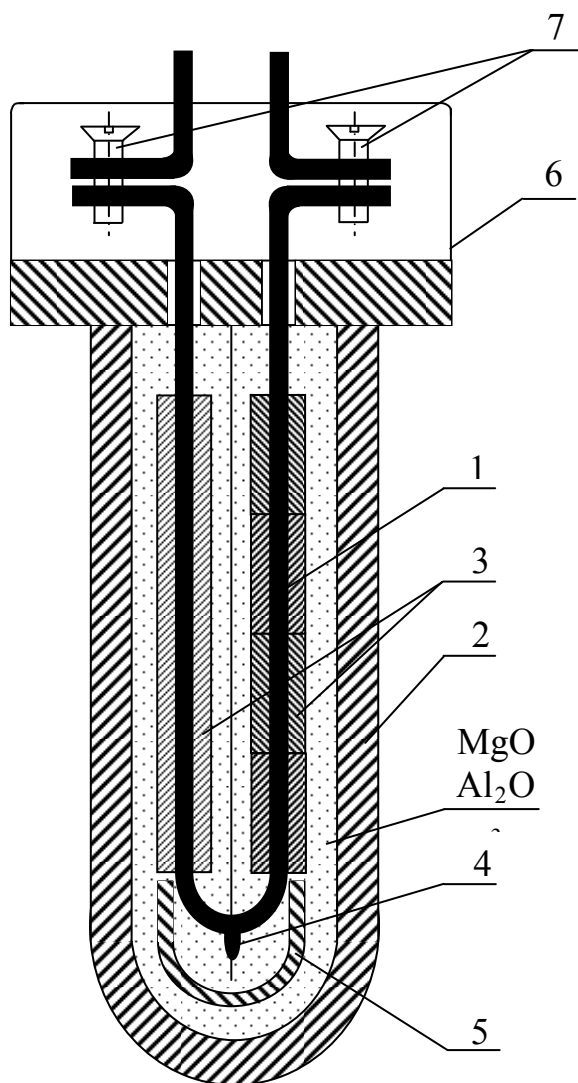


Рис. 2.6. Конструкция погружаемого ТЭП

Термоэлектроды 1 изолируются друг от друга и от защитного металлического чехла 2 керамическими или фарфоровыми бусами одно – или двухканальными трубками 3. Рабочий конец ТЭП 4 оставляется голым и изолируется фарфоровым наконечником 5. Защитный чехол 2, изготовленный из нержавеющей стали, соединяется с пластмассовой головкой 6, в которой термоэлектроды с помощью клемм 7 соединяются компенсационными (термоэлектродными) проводами с измерительным прибором. Для агрессивных сред для изготовления защитных чехлов применяется металлокерамика или стальные трубки, покрытые слоем

тугоплавкой эмали. Все свободное пространство в защитном чехле заполняется порошком MgO или Al₂O₃ для лучшей теплопроводности и изоляции, а верхнее отверстие чела заливается компаундом.

Для решения отдельных задач измерения температуры применяются различные способы соединения термопар. Наиболее распространенные из них термобатарея и дифференциальная термопара.

Для увеличения результирующей ТЭДС применяется последовательное включение нескольких термопар в термобатарею. Схема термобатареи приведена на рис. 2.7.

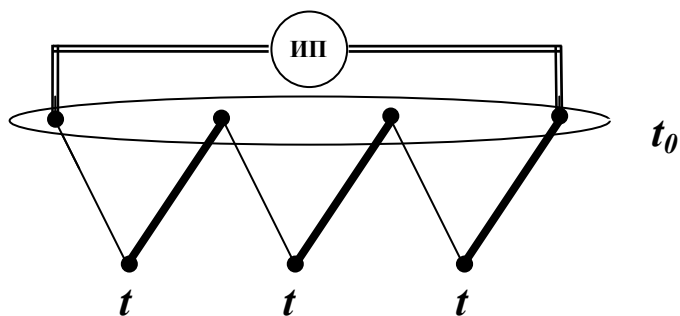


Рис. 2.7. Термобатарея

У термобатареи, состоящей из n термопар (рис. 2.7), ТЭДС суммируется:

$$E_{рез} = n \cdot E(t, t_0),$$

где n — число термопар.

Такое включение термопар применяется при малых разностях температур ($t - t_0$), при этом немного уменьшается погрешность измерения.

Для измерения разности температур в двух точках используют дифференциальную термопару, схема которой приведена на рис. 2.8.

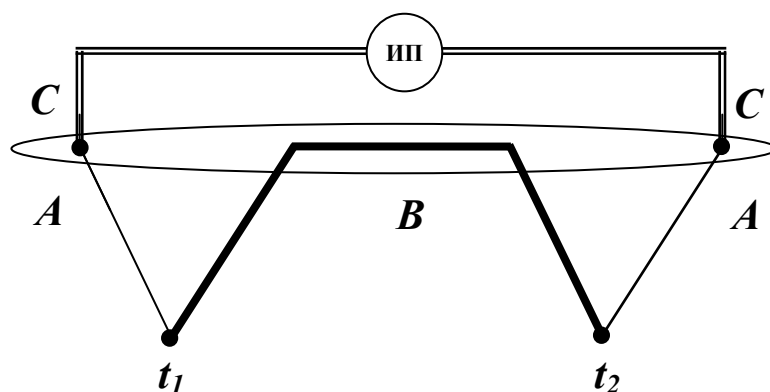


Рис. 2.8. Дифференциальная термопара

Если ТЭДС измеряется в интервале температур $t_1 - t_2$, то результирующая ТЭДС равна:

$$E(t_1, t_2) = k \cdot E(t_1 - t_2).$$

Линейная зависимость ТЭДС от температуры дифференциального ТЭП для любой номинальной статической характеристики справедлива, если $(t_1 - t_2) \leq 20 \div 25$ °С.

Проверка технических ТЭП производится методом сличения показаний поверяемого ТЭП с показаниями эталонного платинородий-платинового ТЭП.

Для нагрева ТЭП до $t \leq 300$ °С применяют термостаты, а свыше 300 °С применяют горизонтальную электрическую трубчатую печь. Свободные концы термопар помещаются в нулевой термостат.

Для измерения ТЭДС применяют эталонные потенциометры постоянного тока класса точности не ниже 0,05 (например: ПП-63; УПП-60М и т.п.). Для проверки ТЭП используются калибраторы температуры (например: СОМРАСТ и др.).

Проверка производится согласно ГОСТ Р 8.338-2002 «Методика поверки».

2.10. КОМПЕНСАЦИОННЫЕ ПРОВОДА

Из конструктивного оформления ТЭП очевидно, что холодные концы термопары находятся в головке ТЭП, где $t'_0 > t_0 = 0$ °С. Следовательно, результирующая ТЭДС будет отличаться от действительной на величину поправки $E(t'_0, 0$ °С). Действительная температура холодных концов t'_0 может достигать 50 °С и выше, а также может меняться во времени. Поэтому ТЭП подсоединяется к измерительному прибору не медными соединительными проводами, а специальными компенсационными проводами или же холодные концы ТЭП уводят в зону с более низкой и постоянной температурой. Схемы соединения ТЭП с измерительным прибором приведены на рис. 2.9. Компенсационные (термоэлектродные) провода развивают ту же ТЭДС, как и термоэлектроды термопары, при $0 < t'_0 \leq 100$ °С, т.е. практически они являются продолжением термоэлектродов.

Таким образом, компенсационные провода – это провода, которые развивают такую же ТЭДС, что и термоэлектроды термопары при температуре свободных концов менее или равной 100 °С. Они предназначены для отвода холодных концов термопары в зону более низких и постоянных температур или же для непосредственного подсоединения ТЭП к измерительному прибору.

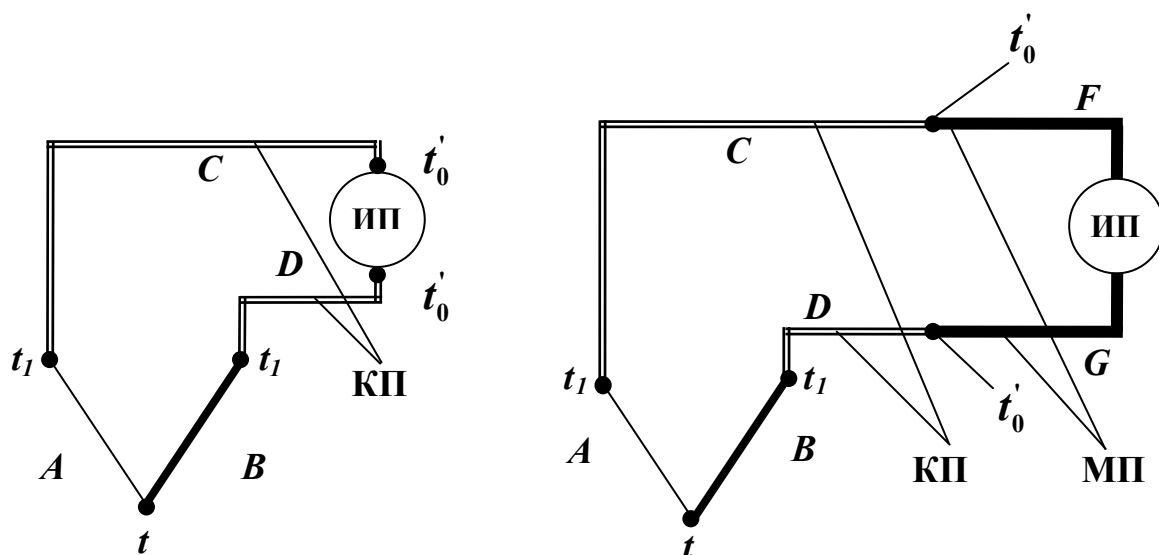


Рис. 2.9. Схемы соединения ТЭП с измерительным прибором:
 КП – компенсационные провода; МД – медные провода

Компенсационные провода изготавливаются двухжильными из тех же материалов, что и термоэлектроды термопары или из более дешевых материалов. Технические и метрологические характеристики компенсационных проводов приведены в табл. 2.5.

Таблица 2.5

Технические и метрологические характеристики некоторых компенсационных проводов

Тип ТЭП	Марка КП	Материал жил	Окраска изоляции	Развиваемая ТЭДС, мВ	Допускаемая погрешность, мВ
ТХК(L)	ХК	Хромель(+)	Фиолетовый (черный)	~ 6,9	± 0,2
		Копель (-)	Желтый (оранжевый)		
ТХА(K)	М	Медь (+)	Красный	~ 4,1	± 0,15
		Константан (-)	Коричневый		
ТПП(S)	П	Медь (+)	Красный	~ 0,64	± 0,003
		Сплав ТП (-) (99,4%Cu+0,6% Ni)	Зеленый		

2.11. ПИРОМЕТРИЧЕСКИЕ МИЛЛИВОЛЬТМЕТРЫ

Пирометрические милливольтметры предназначены для измерения температуры в комплекте с ТЭП (стандартной градуировки). Это магнитоэлектрические приборы. Принцип действия пирометрических милливольтметров основан на взаимодействии неподвижного постоян-

ного магнита и постоянного тока, протекающего через обмотку подвижной рамки. Схема пирометрического милливольтметра представлена на рис. 2.10.

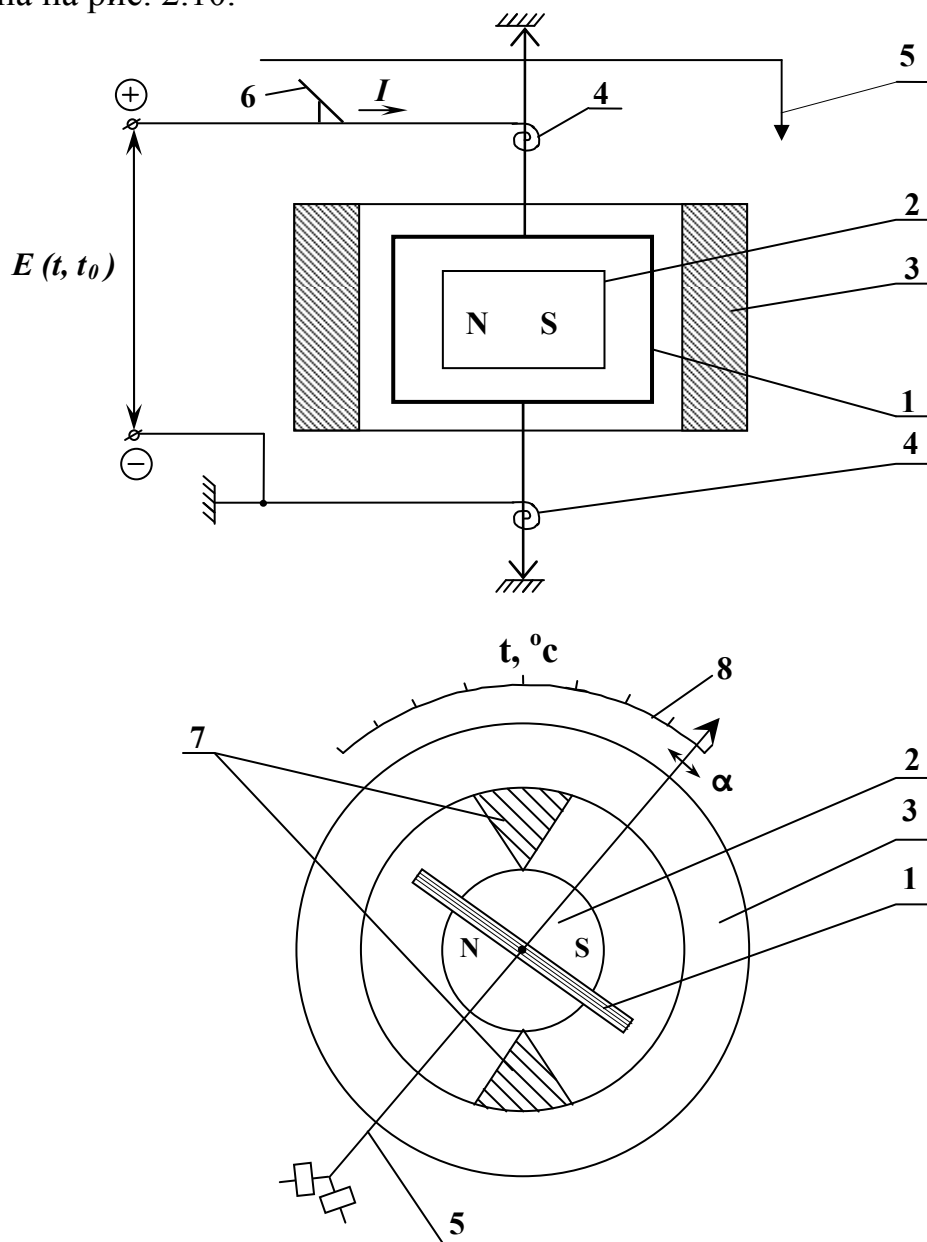


Рис. 2.10. Схема пирометрического милливольтметра:
 1 – рамка; 2 – постоянный магнит; 3 – неподвижное кольцо;
 4 – противодействующие пружины; 5 – стрелка;
 6 – корректор нуля; 7 – держатели; 8 – шкала

Проводник в форме прямоугольной рамки 1 помещен в радиальное поле постоянного магнита 2. Для создания радиального магнитного поля, т.е. поля с одинаковой магнитной индукцией, круглый магнит и рамка помещены в кольцо 3, выполненное из магнитомягкой стали. При прохождении тока I через рамку появляется магнитное поле перпендикулярное полю постоянного магнита 2. В результате взаимодействия этих магнитных полей образуется вращающий момент

$$M_{\text{вр}} = \omega \cdot b \cdot l \cdot B \cdot I, \quad (2.25)$$

где ω – число витков в рамке,
 b, l – ширина и активная длина рамки,
 B – магнитная индукция,
 I – сила тока.

Величины ω, b, l, B постоянны, а произведение этих величин характеризует потокосцепление рамки:

$$\psi = \omega \cdot b \cdot l \cdot B.$$

Тогда вращающий момент будет равен:

$$M_{\text{вр}} = \psi \cdot I \quad (2.26)$$

В момент равновесия подвижной части механизма вращающий момент будет равен противодействующему моменту

$$M_{\text{вр}} = M_{\text{п}}.$$

Противодействующий момент $M_{\text{п}}$ создается противодействующей пружиной 4 и вычисляется по формуле

$$M_{\text{п}} = k_{\text{п}} \cdot \alpha,$$

где $k_{\text{п}}$ – удельный противодействующий момент,
 α – угол перемещения стрелки 5.

Таким образом, можно записать, что угол перемещения стрелки пирометрического милливольтметра будет равен:

$$\alpha = \frac{\psi}{k_{\text{п}}} \cdot I = S_I \cdot I, \quad (2.27)$$

где S_I – чувствительность магнитоэлектрического механизма к току.

Из уравнения (2.27) видно, что угол перемещения стрелки прямо пропорционален величине тока I , а так же, чем больше S_I , тем меньший ток нужен для равного перемещения подвижной части.

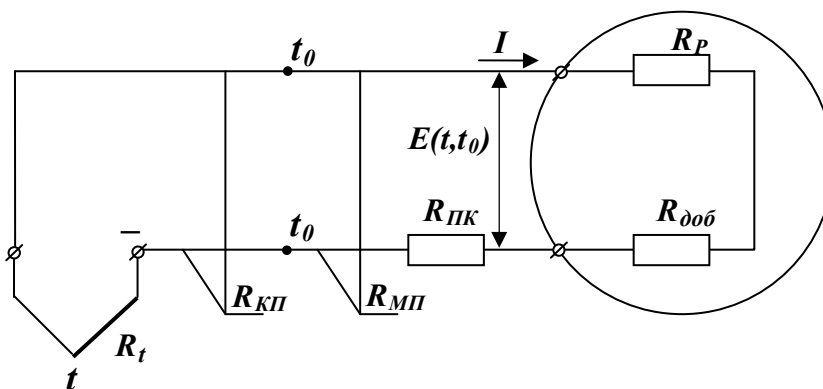


Рис. 2.11. Схема измерения ТЭДС термопары милливольтметром

Согласно схеме (рис. 2.11) величина тока I , протекающего через рамку, равна:

$$I = E(t, t_0) / (R_t + R_{\text{кп}} + R_{\text{мп}} + R_{\text{пк}} + R_{\text{м}})$$

где $E(t, t_0)$ – ТЭДС термопары;

- R_t – сопротивление термопары;
- $R_{КП}$ – сопротивление компенсационных проводов;
- $R_{МП}$ – сопротивление медных проводов;
- $R_{ПК}$ – сопротивление подгоночной катушки;
- $R_M = R_p + R_{доб}$ – внутреннее сопротивление МВ, состоящее из сопротивления рамки и добавочного сопротивления;
- R_p – сопротивление рамки, намотанной медным проводом;
- $R_{доб}$ – добавочное сопротивление милливольтметра.

Пирометрический милливольтметр имеет корректор нуля δ и арретир, предназначенный для фиксации подвижной части во время транспортировки. Милливольтметры оснащены устройством для компенсации температуры свободных концов термопары.

Классы точности милливольтметров $K = 1; 1,5; 2,5$. Типы пирометрических милливольтметров: М-64 (показывающий), М-64-02 (показывающий и сигнализирующий), Ш4500, Ш69000, МВУ6-41 и МВУ6-51 (узкопрофильные) и т.п.

2.12. ИЗМЕРЕНИЕ ТЭДС КОМПЕНСАЦИОННЫМ МЕТОДОМ

Измерение температуры пирометрическими милливольтметрами не обеспечивают должной точности, имеет место значительные дополнительные погрешности от температуры окружающей среды, нет записи показаний.

Точность измерения ТЭДС увеличивается, а также значительно уменьшаются дополнительные погрешности, если применить компенсационный метод измерения. Он основан на уравнивании (компенсации) измеряемой ТЭДС известной разностью потенциалов, образованной вспомогательным источником тока на калиброванном сопротивлении. Схема компенсационного метода измерения ТЭДС термопары представлена на рис. 2.12.

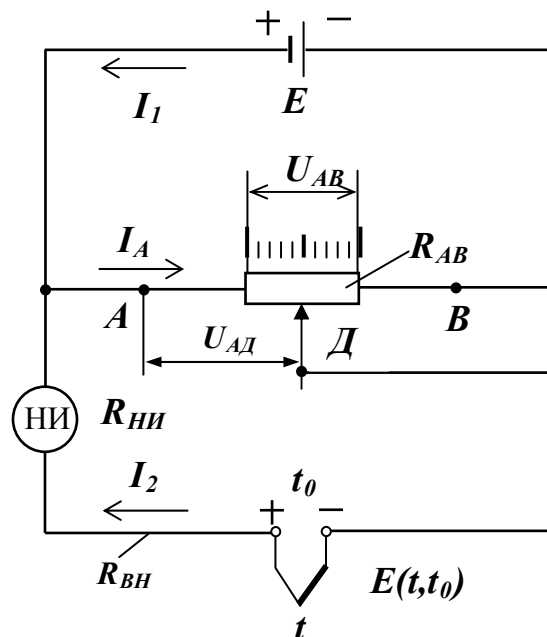


Рис. 2.12. Схема компенсационного метода измерения ТЭДС термопары

Ток от вспомогательного источника E проходит по цепи, в которой между точками A и B включен реохорд R_{AB} . Последовательно с ТЭП включен нуль-индикатор (НИ) со шкалой, имеющей 0 по середине, и предназначенный для показания наличия или отсутствия (стрелка на отметке 0) тока в цепи.

Термопара включена таким образом, что ее ток I_{AD} на участке R_{AD} идет в том же направлении, что и ток от вспомогательного источника E . На основании первого закона Кирхгофа значение тока равно:

$$I_{AD} = I_1 + I_2. \quad (2.28)$$

На основании второго закона Кирхгофа значение ТЭДС равно:

$$\begin{aligned} E(t, t_0) &= I_2 \cdot (R_{НИ} + R_{ВН}) + I_{AD} \cdot R_{AD} = \\ &= I_2 \cdot (R_{НИ} + R_{ВН}) + R_{AD} \cdot (I_1 + I_2) = \\ &= I_2 \cdot (R_{НИ} + R_{ВН} + R_{AD}) + I_1 \cdot R_{AD}. \end{aligned} \quad (2.29)$$

Из уравнения (2.29) ток I_2 , протекающий через НИ, равен:

$$I_2 = \frac{E(t, t_0) + I_1 \cdot R_{AD}}{R_{НИ} + R_{ВН} + R_{AD}}. \quad (2.30)$$

Передвигая движок реохорда D , т.е. изменяя R_{AD} , при условии $E(t, t_0) < E$, можно найти положение, в котором $I_2 = 0$.

В этом случае ТЭДС термопары будет скомпенсирована падением напряжения на участке реохорда AD , т.е.

$$E(t, t_0) - I_1 \cdot R_{AD} = 0 \quad \text{или} \quad E(t, t_0) = I_1 \cdot R_{AD} = U_{AD}. \quad (2.31)$$

В момент компенсации, согласно уравнению (2.28), $I_{AD} = I_1$, т. е.

$$\frac{U_{AD}}{R_{AD}} = \frac{E}{R_{AB}}.$$

Отсюда $U_{AD} = \frac{E}{R_{AB}} \cdot R_{AD} = E(t, t_0)$, т. к. $\frac{E}{R_{AB}} = \text{Const}$.

Таким образом, $E(t, t_0)$ определяется величиной падения напряжения на участке реохорда R_{AD} и не зависит от сопротивлений $R_{НИ}$ и $R_{ВН}$. Как правило, сопротивление R_{AB} оснащено шкалой отградуированной в мВ.

2.13. ЛАБОРАТОРНЫЕ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ

Точность измерения ТЭДС компенсационным методом зависит от постоянства тока в цепи реохорда R_{AB} . Необходимая сила тока устанавливается и контролируется также компенсационным методом, для этого в компенсационную схему включают третью цепь – цепь нормального элемента. Принципиальная электрическая схема лабораторного потенциометра постоянного тока представлена на рис. 2.13.

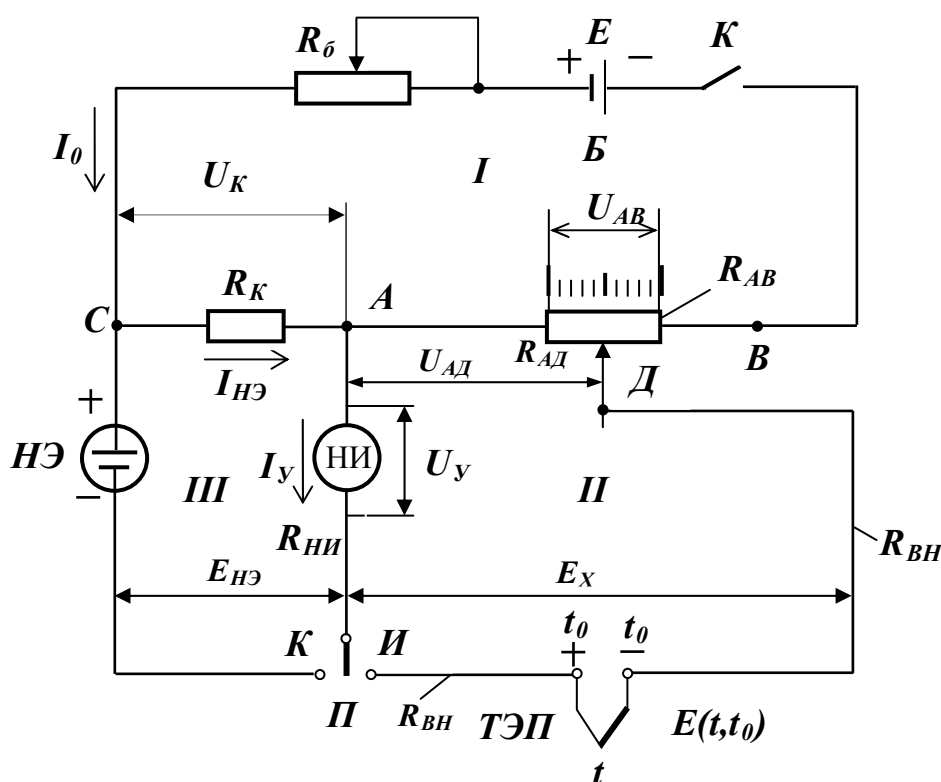


Рис. 2.13. Принципиальная электрическая схема лабораторного потенциометра постоянного тока

На принципиальной электрической схеме потенциометра постоянного тока можно выделить 3 цепи.

Первая цепь – цепь источника питания включает в себя: B – источник тока с напряжением E , R_{δ} – переменный резистор для установки рабочего тока I_0 , R_K – постоянный резистор, R_{AB} – прецизионный (высокоточный) переменный резистор с подвижным контактом D , K – кнопка включения первой цепи.

Вторая цепь измерения ТЭДС термопары включает в себя: $TЭП$ – термоэлектрический преобразователь, $НИ$ – нуль индикатор, R_{AD} – часть сопротивления R_{AB} , Π – переключатель (положение I – измерение).

Третья цепь нормального элемента включает в себя: **НЭ** – нормальный элемент – образцовый источник ЭДС (мера ЭДС), предназначенный для контроля постоянства разности потенциалов между конечными точками сопротивления R_{AD} , развивает строго постоянное значение ЭДС ($E_{НЭ} = 1,0189$ В), имеет малую мощность, и не может служить источником питания; R_K – постоянный резистор; НИ – нуль индикатор, **П** – переключатель (положение **К** – контроль).

Чтобы установить *рабочий ток* $I_0 = \text{Const}$ переключатель ставится в положение **К** – контроль, т.е. замыкаем цепь **Ш**, нажимаем кнопку **К**, т.е. замыкаем цепь **I**. В этом случае согласно первому закону Кирхгофа:

$$I_{НЭ} = I_0 + I_y, \quad (2.32)$$

а согласно второму закону Кирхгофа:

$$E_{НЭ} = I_{НЭ} \cdot R_K + I_y \cdot R_{НИ} = U_K + U_y. \quad (2.33)$$

Передвигая движок резистора R_δ добиваемся того, чтобы стрелка НИ установилась на ноль. Это свидетельствует об отсутствии тока в цепи **Ш**, т.е. $I_y = 0$, что возможно лишь в тот момент, когда $E_{НЭ}$ будет скомпенсирована обратным ей по знаку падением напряжения на концах сопротивления R_K (участок цепи **СА**).

Из уравнения (2.33) получим:

$$I_y = \frac{E_{НЭ} - I_{НЭ} \cdot R_K}{R_{НИ}}.$$

Откуда в момент компенсации:

$$E_{НЭ} - I_{НЭ} \cdot R_K = E_{НИ} - U_K = 0, \text{ т.е. } E_{НЭ} = U_K.$$

В свою очередь $E_{НЭ} = I_{НЭ} \cdot R_K$. Учитывая уравнение (2.32) и то, что в момент компенсации $I_y = 0$; $I_{НЭ} = I_0$, получим $E_{НЭ} = I_0 \cdot R_K$.

По закону Ома:

$$I_0 = \frac{E_{НЭ}}{R_K} = \text{Const}. \quad (2.34)$$

Для измерения *ТЭДС* переключатель **П** переключается в положение **И** – измерение, подключаем ТЭП последовательно с НИ, измерительному сопротивлению $R_{НИ}$. При этом стрелка будет показывать наличие тока в цепи, т.е. не стоять на нуле. Значение уравновешивающего тока:

$$I_y = \frac{E_x - U_{AD}}{R_{НИ} + R_{ВН}} = \frac{\Delta U_{НЕБ}}{R_{НИ} + R_{ВН}} \quad (2.35)$$

Согласно закону Ома:

$$U_y = I_y \cdot R_{НИ} = \frac{\Delta U_{НЕБ}}{R_{НИ} + R_{ВН}} \cdot R_{НИ}. \quad (2.36)$$

Числитель и знаменатель уравнения (2.36) поделим на $R_{НИ}$. Тогда получим:

$$U_y = \frac{\Delta U_{НЕБ}}{1 + \frac{R_{ВН}}{R_{НИ}}}. \quad (2.37)$$

Так как $R_{НИ} \gg R_{ВН}$, то:

$$U_y \approx \Delta U_{НЕБ} = E_X - U_{АД}. \quad (2.38)$$

Перемещая движок реохорда $R_{АД}$ находим такое положение, при котором $I_y = 0$ и $U_y = 0$. Следовательно, ТЭДС термопары компенсируется падением напряжения на участке реохорда $АД$, т.е.

$$E_X = E(t, t_0) = U_{АД}. \quad (2.39)$$

В момент компенсации

$$U_{АД} = I_0 \cdot R_{АД} = \frac{E_{НЭ}}{R_K} \cdot R_{АД}, \quad E(t, t_0) = \frac{E_{НЭ}}{R_K} \cdot R_{АД}.$$

Так как $\frac{E_{НЭ}}{R_K} = Const$, то величина измеряемой ТЭДС определяется величиной падения напряжения на сопротивлении $R_{АД}$ или положением движка реохорда. Сопротивление $R_{АВ}$ оснащено шкалой отградуированной в мВ.

К числу потенциометров постоянного тока можно отнести, например, потенциометры типа ПП-63 или УПП-60М, имеющих класс точности 0,05.

2.14. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ПОТЕНЦИОМЕТРЫ

Автоматические электронные потенциометры (АЭП) предназначены для измерения температуры в комплекте с ТЭП стандартной градуировки. В отличие от лабораторных потенциометров АЭП не имеют НИ, он заменен на электронный усилитель, а НЭ заменен источником стабилизированного питания. Измерительные схемы всех АЭП предусматривают автоматическое введение поправки на температуру свободных концов ТЭП.

Принципиальная измерительная схема одноточечного АЭП приведена на рис. 2.14. На схеме приняты следующие обозначения: R_P – реохорд (переменное сопротивление), $R_{Ш}$ – шунт реохорда,

$R_{НР} = \frac{R_P \cdot R_{Ш}}{R_P + R_{Ш}}$ – нормированное сопротивление реохорда, $R_{П}$ – резистор для установки верхнего предела измерения,

$R_{НР} = \frac{R_{НР} \cdot R_{П}}{R_{НР} + R_{П}}$ – при-

веденное сопротивление реохорда, R_H – резистор для установки нижнего предела измерения, R_B – резистор ограничивающий силу тока I_1 , R_T', R_T'' – резисторы регулирующие I_0 , соответственно грубо и точно, R_M – сопротивление, предназначенное для автоматического введения по

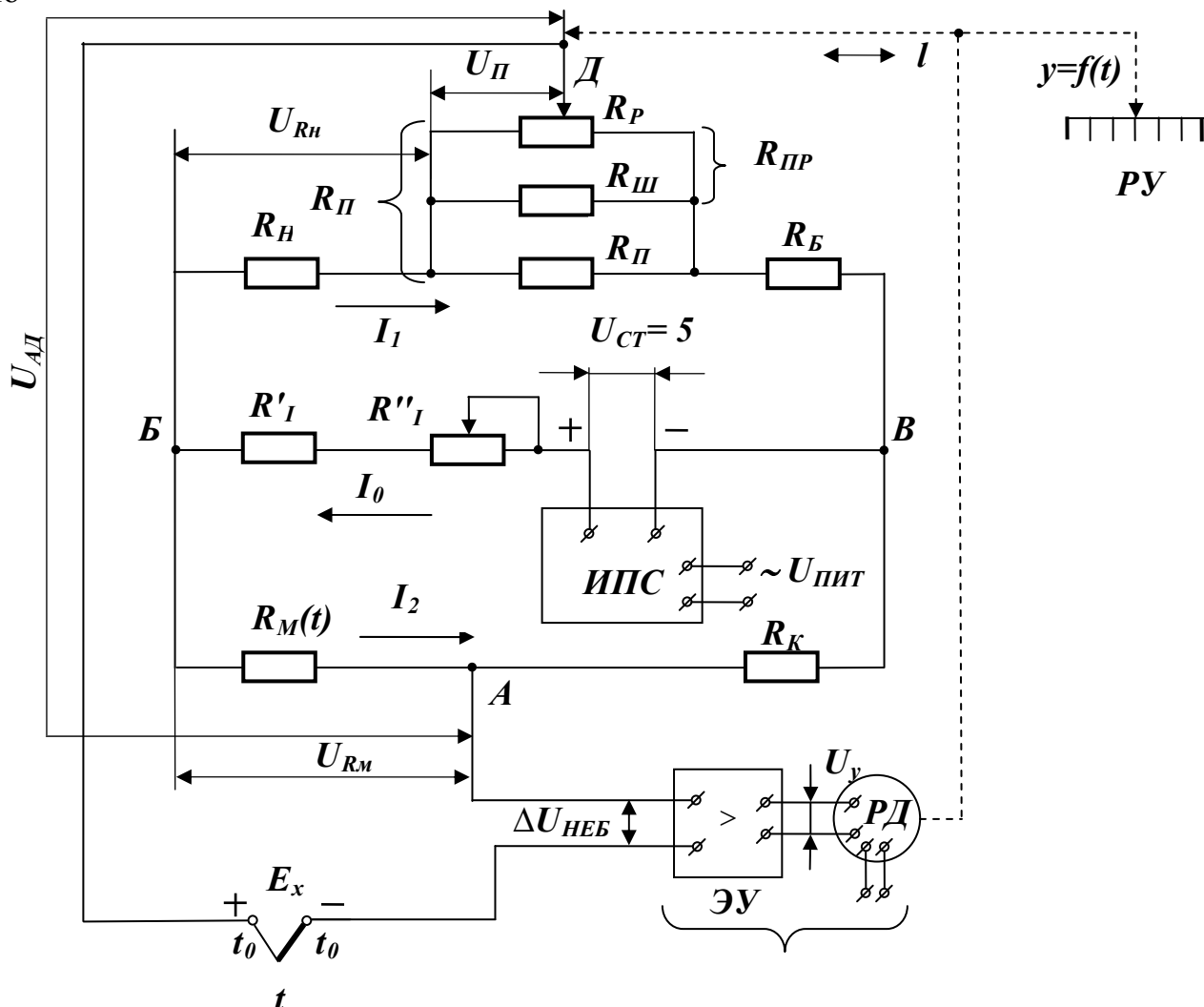


Рис. 2.14. Принципиальная измерительная схема АЭП:
 РД – реверсивный двигатель, РУ – регистрирующее устройство,
 ЭУ – электронный усилитель, Д – движок реохорда,
 ИПС – источник питания стабилизированный

правки на температуру свободных концов ТЭП, R_K – резистор для проверки постоянства стандартной силы тока I_2 , $I_1 = 3 \text{ мА} = \text{Const}$ – сила тока в контуре реохорда, $I_2 = 2 \text{ мА} = \text{Const}$ – сила тока в контуре медного резистора R_M , $I_0 = (I_1 + I_2) = 5 \text{ мА} = \text{Const}$ – суммарный ток в диагонали питания BB , E_X – измеряемая ТЭДС, приложенная между точками A и D (AD – измерительная диагональ потенциометра).

Напряжение небаланса равно

$$\Delta U_{\text{НЕБ}} = E_X - U_{\text{АД}}, \quad (2.40)$$

где U_{AD} – компенсирующее падение напряжения на сопротивлениях схемы, между точками A и D .

В момент компенсации $\Delta U_{НЕБ} = 0$, при этом ТЭДС термопары будет скомпенсирована падением напряжения на сопротивлениях R_{PP} , R_H и R_M , т.е.

$$E_X = U_{AD} = U_{PP} + U_{RH} - U_{RM}, \quad (2.41)$$

где U_{PP} – падение напряжения на приведенной части сопротивления реохорда, т.е. на R_{PP} ;

U_{RH} – падение напряжения на резисторе R_H ;

U_{RM} – падение напряжения на медном резисторе R_M (знак минус, так как ток I_2 направлен противоположно току I_1).

Если измеряемая температура постоянна, то показания прибора не изменяются, движок реохорда неподвижен и ТЭДС термопары, согласно уравнению компенсации (2.41), равна:

$$E_X = E(t, t_0) = U_{AD}, \quad (2.42)$$

где t – измеряемая температура;

t_0 – температура холодных концов ТЭП.

В АЭП предусматривается автоматическое введение поправки на температуру свободных концов термопары (t_0). Предположим, повысилась температура свободных концов термопары, т.е. $t_0 < t'_0$. Это вызовет уменьшение результирующей ТЭДС. Однако показания потенциометра не изменяются. Обозначим результирующую ТЭДС:

$$E'_X = E(t, t'_0). \quad (2.43)$$

В этом случае на вход измерительной схемы потенциометра будет подаваться

$$E'_X = E_X - E(t'_0, t_0) = U_{PP} + U_{RH} - (U_{RM} + \Delta U_{RM}), \quad (2.44)$$

где $E(t'_0, t)$ – поправка на температуру свободных концов ТЭП;

U_{RM} – падение напряжения на медном резисторе при температуре $t_0 = t_0^{2p} = 30^\circ\text{C}$;

ΔU_{RM} – увеличение падения напряжения на медном резисторе из-за увеличения его температуры.

Следовательно, U_{AD} уменьшается.

Увеличение падения напряжения на медном резисторе определяется по формуле:

$$\Delta U_{R_M} = I_2 \cdot \Delta R_M = I_2 \cdot R_{M0} \cdot \alpha \cdot (t'_0 - t_0), \quad (2.45)$$

где R_{M0} – значение сопротивления при $t_0 = t_0^{sp} = 30$ °С;

α – температурный коэффициент сопротивления меди;

t'_0 – текущее значение температуры свободных концов ТЭП, не равное градуировочной температуре t_0^{sp} .

Так как $I_2 = \text{Const}$, а измерение температуры свободных концов ТЭП, а, следовательно, и температуры медного резистора (они монтируются рядом и имеют одинаковую температуру) ведет к увеличению значения сопротивления R_M и как следствие к увеличению U_{R_M} . Рассматривая уравнение (2.44) можно прийти к выводу, что

$$E(t'_0, t_0) = \Delta U_{R_M}. \quad (2.46)$$

Следовательно, при наличии медного резистора при любой температуре свободных концов ТЭП показания потенциометра не изменяются, а с помощью медного резистора автоматически вводится поправка на температуру свободных концов ТЭП.

Изменилась измеряемая температура, т.е. $t_1 > t$, нарушился баланс измерительной схемы $E(t_1, t_0) > U_{Ад}$. На входе электронного усилителя (ЭУ) появляется $\Delta U_{НЕБ1} = E(t_1, t_0) - U_{Ад}$. В ЭУ сигнал преобразуется из постоянного в переменный, усиливается по мощности и напряжению и подается на управляющую обмотку *РД*. В свою очередь *РД*, вращаясь в соответствующую сторону, передвигает одновременно стрелку и движок реохорда, изменяя $U_{ПР}$ до тех пор, пока $E(t_1, t_0) = U_{Ад1}$ или $\Delta U_{НЕБ1} = 0$.

По вышеизложенному принципу работают автоматические потенциометры типов КПП-1, КСП-1, КСП-2, КСП-3 и КСП-4, которые до настоящего времени достаточно широко применяются на тепловых электростанциях.

В основу работы современных автоматических потенциометров и мостов типов Диск-250, А100-Н и т.п. положен принцип электромеханического следящего уравнивания. Входной сигнал от датчика предварительно усиливается и лишь после этого производится уравнивание его сигналом компенсирующего элемента (реохорда). Структурная схема такого прибора приведена на рис. 2.15.

Например, в приборе ДИСК-250 входной сигнал от датчика *Д* поступает во входное устройство *ВхУ*, где он нормализуется по нижнему пределу измерения для удобства его дальнейшей обработки. Кроме того, входное устройство содержит источник тока для питания медного резистора температурной компенсации изменения ТЭДС холодных спаев термоэлектрических преобразователей или для питания термопреобразователей сопротивления.

В приборе ДИСК-250И входной сигнал от датчика *Д* поступает сначала в блок искрозащиты *БИ*, предохраняющий датчик от опасного повышения тока и напряжения, которые могут возникнуть при аварийном состоянии прибора.

Затем входной сигнал поступает на усилитель *УВС* с жесткой отрицательной обратной связью, где сигнал нормализуется по верхнему пределу измерения. Таким образом, с выхода *УВС* снимается сигнал, нормализованный по нижнему и верхнему пределам измерений. При изменении входных сигналов от нижнего до верхнего пределов измерения выходной сигнал усилителя *УВС* в приборах изменяется в пределах от минус 0,5 до минус 8,5 В.

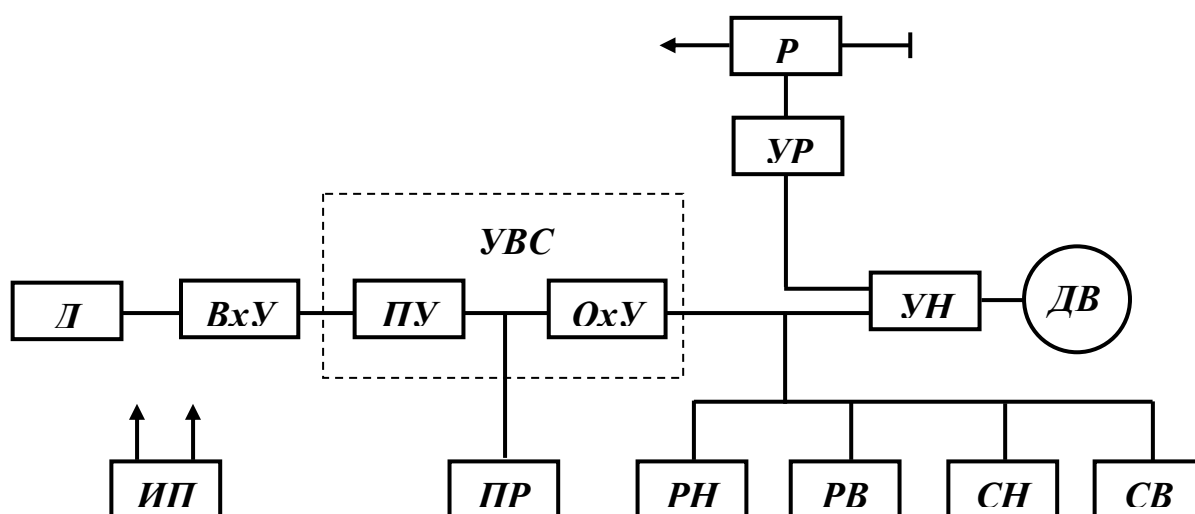


Рис. 2.15. Структурная схема потенциометра с электромеханическим следящим уравниванием

С предварительного усилителя *ПУ УВС* снимается сигнал, изменяющийся в пределах от 0 до плюс 4 В при изменении входных сигналов от нижнего до верхнего пределов измерений.

Сигнал с реохорда *Р*, преобразованный усилителем *УР* в напряжение, изменяющееся от плюс 0,5 до плюс 8,5 В, сравнивается на входе усилителя небаланса *УН* с сигналом *УВС*.

Работа прибора происходит следующим образом.

При изменении значения измеряемого параметра на входе усилителя *УН* появляется сигнал небаланса, который усиливается этим усилителем и управляет работой двигателя *ДВ*. Двигатель, в свою очередь, перемещает движок реохорда *Р* до тех пор, пока сигнал с усилителя *УР* не станет равным (по абсолютной величине) сигналу с усилителя *УВС*. Таким образом, каждому значению измеряемого параметра соответ-

вует определенное положение движка реохорда и связанного с ним указателя прибора (на схеме не показан).

Сопротивление обмотки реохорда для всех НСХ и диапазонов измерений одинаково и составляет $(565 \pm 10 \%)$ Ом.

Сигнал с предварительного усилителя *ПУ* поступает на устройство преобразования *ПР* входного сигнала в выходной электрический унифицированный сигнал от 0 до 5 или от 4 до 20 мА. Сигнал с усилителя *УВС* поступает на входы усилителей выходных устройств *РН*, *РВ*, *СН*, *СВ*:

– *РН*, *РВ* – трехпозиционное регулирующее устройство с заданием уставок на регулирование «меньше» и «больше»;

– *СН*, *СВ* – трехпозиционное сигнализирующее устройство с заданием уставок по сигнализации «меньше» и «больше».

Питание всех функциональных узлов осуществляется от источника стабилизированного напряжения *ИП*.

2.15. ТЕРМОПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Термопреобразователь сопротивления (ТПС) – это первичный измерительный преобразователь температуры, предназначенный для ее измерения в комплекте с измерительными приборами: логометрами или автоматическими мостами.

Измерение температуры ТПС основано на свойстве проводников и полупроводников, изменять свое активное электрическое сопротивление при изменении их температуры, т.е. $R_t = f(t)$.

Для большинства проводниковых ТПС зависимость активного электрического сопротивления R_t при температуре t приблизительно имеет вид:

$$R_t = R_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (t - t_0)], \quad (2.47)$$

где R_0 – начальное сопротивление проводника при температуре $t_0 = 0^\circ\text{C}$;

α – температурный коэффициент электрического сопротивления, материала чувствительного элемента ТПС.

Исходя из уравнения (2.47) можно сформулировать требования к материалам, предназначенных для изготовления чувствительных элементов ТПС:

1. Предпочтителен большой температурный коэффициент электрического сопротивления α , который принято характеризовать, измеряя сопротивление проводника при $t = 0^\circ\text{C}$, т.е. измерять R_0 , и при $t = 100^\circ\text{C}$, т.е. измерять R_{100} . Вычисляем α по формуле:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{R_0 \cdot 100}, \text{K}^{-1} \quad (2.48)$$

или по отношению $W_{100} = R_{100} / R_0$. (2.49)

2. Желательны проводники с большим удельным электрическим сопротивлением:

– для достижения большего значения R_0 , так как абсолютная чувствительность ТПС определяется по формуле:

$$S_{\text{АБС}} = R_0 \cdot \alpha = \frac{\Delta R}{\Delta t},$$

– для уменьшения массы провода и уменьшения инерционности ТПС при выбранном R_0 .

3. Изменение сопротивления под действием температуры желательно иметь линейное и однозначное.

4. Необходимы материалы химически стойкие, с характеристиками неизменными во времени, легко воспроизводимые в химически и физически чистом виде.

В соответствии с вышеизложенными требованиями, а также согласно ГОСТ Р 50393 – 92 и ГОСТ Р 6651 – 94 для изготовления чувствительных элементов ТПС используется платина (ТСП), медь (ТСМ), никель (ТСН).

В зависимости от номинального значения сопротивления при 0°С и номинального значения отношения сопротивлений $W_{100} = R_{100} / R_0$, условные обозначения номинальных статических характеристик (НСХ) должны соответствовать данным приведенным в табл. 2.6.

Таблица 2.6

Номинальные статические и технические характеристики ТПС

Тип ТПС	R_0 , Ом	В народном хозяйстве		Международные	Диапазон измерения температуры, °С
		$W_{100} = 1.385$	$W_{100} = 1.391$		
ТСП	1	1П	1П	$W_{100} = 1.385$ Pt1	–260 ÷ 850 (1100)
	10	10П	10П	Pt10	
	50	50П	50П	Pt50	
	100	100П	100П	Pt100	
	500	500П	500П	Pt500	
	46	–	Гр.21	–	
ТСМ	10	$W_{100} = 1.426$ 10М		$W_{100} = 1.428$ Cu10	–200 ÷ 200
	50	50М		Cu50	
	100	100М		Cu100	
	53	Гр.23		–	
ТСН	100	$W_{100} = 1.617$ 100Н		$W_{100} = 1.617$ Ni100	–60 ÷ 180

Значения отношения сопротивления при температуре t к сопротивлению при температуре 0°C , т.е. $W_t = f(t) = R_t / R_0$, вычислены и приведены в ГОСТ Р 50353–92 в виде таблиц с интервалом 1°C . Номинальные статические характеристики преобразования ТПС определяют по уравнению:

$$R_t = W_t \cdot R_0. \quad (2.50)$$

Метрологические характеристики ТПС представляются классами допуска и допускаемыми отклонениями.

ТПС присвоены следующие классы допуска: А, В, С. В целях обеспечения взаимозаменяемости технических ТПС установлены допускаемые отклонения сопротивления чувствительного элемента при 0°C (т.е. для R_0) от номинального значения и отношения сопротивлений $W_{100} = R_{100} / R_0$, которые представлены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Допускаемые отклонения (погрешности) технических ТПС

Класс допуска Тип ТПС	А	В	С
Допускаемые отклонения ΔR_0 , %			
ТСП	0,05	0,1	0,2
ТСМ	0,05	0,1	0,2
ТСН	-	-	0,24
Допускаемые отклонения W_{100} , отн.ед.			
ТСП	1,385 – 0,0005	} – 0,001	} – 0,0015
	1,391 – 0,0004		
ТСМ	1,426 – 0,0005	} – 0,001	} – 0,002
	1,428 – 0,0005		
ТСН	–	–	1,617–0,004

Примечание. Plusовое допускаемое значение W_{100} не ограничиваются.

Таблица 2.8

Допускаемые отклонения температуры Δt_D ($^\circ\text{C}$) от НСХ

Класс допуска Тип ТПС	А	В	С
ТСП	$\pm(0,15+2 \cdot 10^{-3} \cdot t)$	$\pm(0,3+5 \cdot 10^{-3} \cdot t)$	$\pm(0,6+8 \cdot 10^{-3} \cdot t)$
ТСМ	$\pm(0,15+1,5 \cdot 10^{-3} \cdot t)$ $-50 \div 120^\circ\text{C}$	$\pm(0,25+3,5 \cdot 10^{-3} \cdot t)$ $-200 \div 200^\circ\text{C}$	$\pm(0,5+6,5 \cdot 10^{-3} \cdot t)$ $-200 \div 200^\circ\text{C}$
ТСН	–	–	$\pm(0,3+8 \cdot 10^{-3} \cdot t)$

Отклонение сопротивления ΔR_D (Ом), соответствующее значениям Δt_D ($^{\circ}\text{C}$), определяют из уравнения:

$$\Delta R_D = \Delta t_D \cdot \frac{\Delta R}{\Delta t_1},$$

где $\Delta R / \Delta t_1$ – чувствительность ТПС;

ΔR – приращение сопротивления в окрестности температурной точки t ,

Δt_1 – размах окрестности.

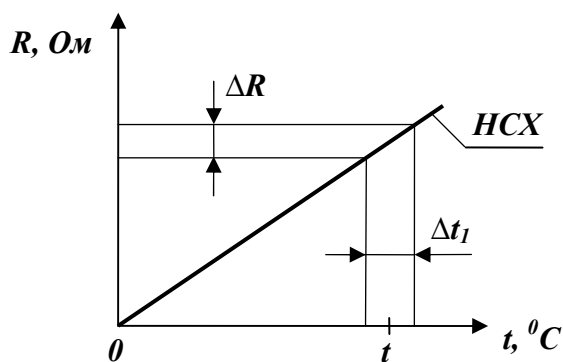


Рис 2.16. Графическое определение чувствительности ТПС в окрестности температурной точки t

Конструктивно ТПС могут быть выполнены так же как и термоэлектрические преобразователи. ТПС состоит из следующих основных частей: чувствительного элемента и защитной арматуры. Чувствительный элемент платинового ТПС представлен на рис. 2.17.

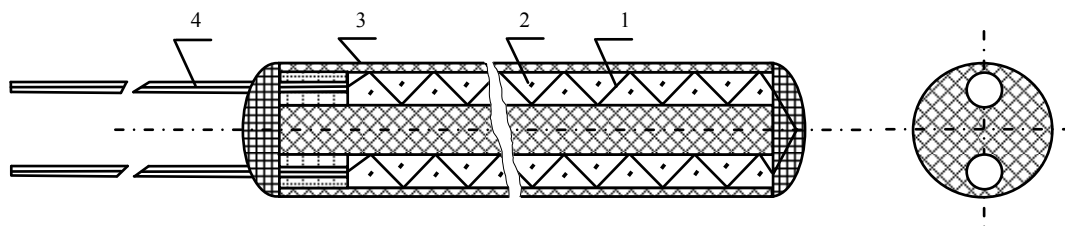


Рис. 2.17. Чувствительный элемент платинового ТПС

Он состоит из двух соединенных последовательно платиновых спиралей 1, расположенных в каналах керамического корпуса 3. К двум левым концам этих спиралей припаяны выводы 4, к которым приварены выводные проводники, изолированные керамическими бусами. Для крепления платиновых спиралей и выводов в керамическом корпусе используют глазурь или термоцемент. Пространство между платиновыми спиральями и стенками каркаса заполнено порошком 2 окиси алюминия, который служит изолятором и улучшает тепловой контакт между спиральями и каркасом. Для подгонки сопротивления R_0 изменяют длину правых по рисунку концов платиновых спиралей с последующей их пайкой.

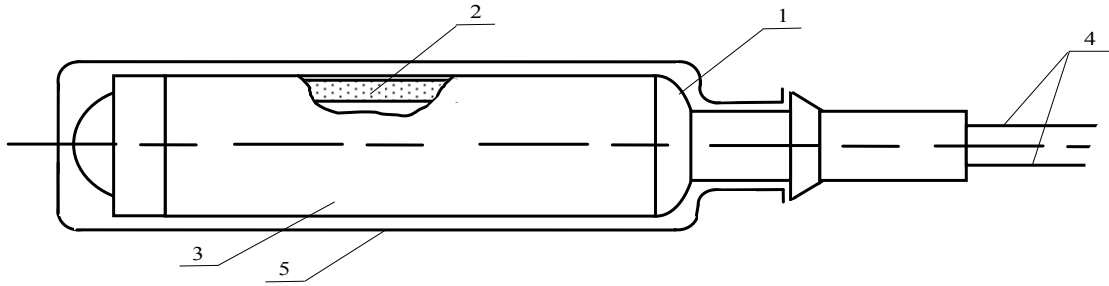


Рис. 2.18. Чувствительный элемент медного ТПС

Чувствительный элемент 1 медного ТПС (рис. 2.18) представляет собой бескаркасную, безындукционную намотку 2 из медной проволоки, покрытую фторопластовой пленкой 3. К намотке припаяны 2 вывода 4. Для обеспечения виброустойчивости чувствительный элемент помещается в тонкостенную металлическую гильзу 5, которая заполняется порошком двуокиси алюминия и герметизируется.

Чувствительные элементы помещаются в защитные металлические чехлы. Которые придают механически прочную конструкцию ТПС, удобную для монтажа и защищают чувствительные элементы от механических и химических воздействий окружающей и измеряемой среды. Одна из конструкций погружаемого термопреобразователя сопротивления приведена на рис. 2.19.

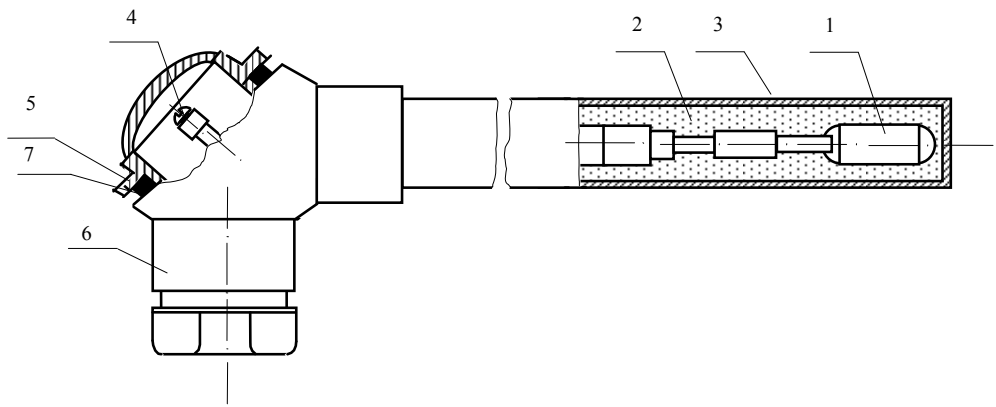
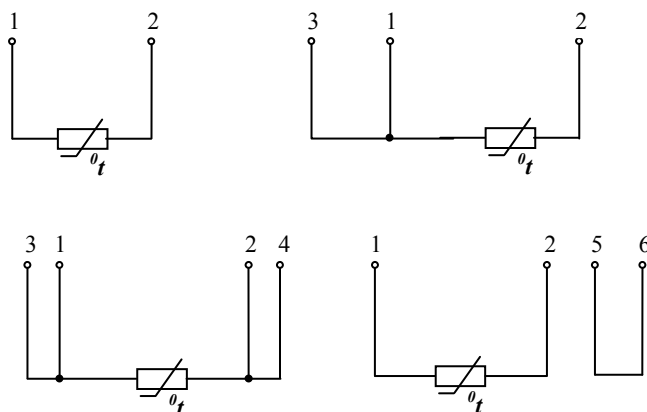


Рис. 2.19. Конструкция термопреобразователя сопротивления:

*1 – чувствительный элемент, 2 – порошок двуокиси алюминия,
3 – металлический защитный чехол, 4 – клеммы, 5 – крышка,
6 – штуцер, 7 – прокладка*

По способу контакта с измеряемой средой ТПС выпускаются погружаемые и поверхностные; по условиям эксплуатации – стационарные и переносные; по защищенности от воздействия окружающей среды – обыкновенные, пылезащитные, водозащищенные, защищенные от агрессивной среды, взрывозащищенные; по устойчивости к механическим воздействиям – обыкновенные и виброустойчивые; по количеству чувствительных элементов для измерения температуры в одной зоне –

одинарные и двойные; по числу зон – однозонные и многозонные; по количеству выводных проводников – с двумя, тремя и четырьмя выводами, схемы которых представлены на рис. 2.20.



*Рис. 2.20. Принципиальные схемы ТПС:
1,2,3 – нумерация выводных клемм или проводов; окраска изоляции
выводных проводов 1- красный; 2 – белый; 3 – голубой*

Стандартные ТПС широко применяются для технических измерений во всех отраслях промышленности и имеют ряд преимуществ: малые погрешности измерения температуры; значительный диапазон измеряемых температур ($0 \div 1100^\circ\text{C}$); возможность дистанционного измерения температуры в комплекте с логометрами и автоматическими мостами; универсальность и взаимозаменяемость.

Полупроводниковые ТПС или термисторы изготавливаются из окислов металлов, применяется в диапазоне температур $-90 \div 180^\circ\text{C}$, имеет экспоненциальную зависимость сопротивления от температуры:

$$R_t = A \cdot \exp\left(\frac{-B}{T}\right).$$

Конструкции чувствительных элементов разнообразны: от бусинок малых размеров до пластин больших размеров.

Существенными недостатками термисторов является невоспроизводимость их характеристик и не взаимозаменяемость. Меняя термистор необходимо прибегать к индивидуальной градуировке измерительной системы. Поэтому они не нашли широкого применения в промышленности.

2.16. МОСТОВЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Наиболее точно значение сопротивления R_T ТПС можно измерить с помощью мостовых схем нулевым методом или методом отклонения. По нулевому методу работают уравновешенные мосты, а по методу отклонений – неуравновешенные. Наибольшее распространение в практике измерения температуры нашли уравновешенные мосты.

Принципиальная схема четырех плечевого уравновешенного моста представлена на рис 2.21.

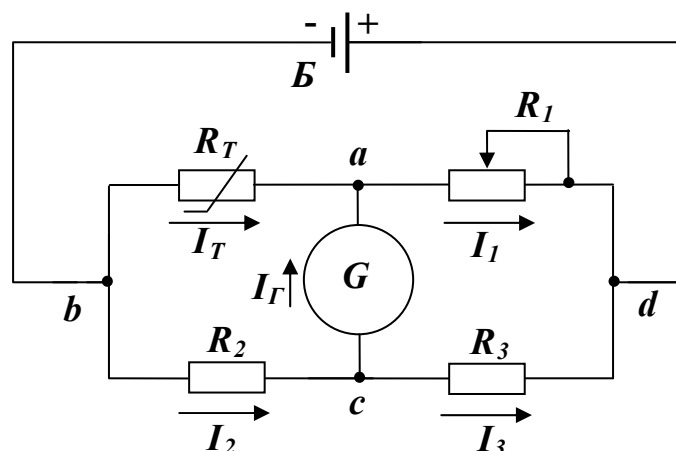


Рис. 2.21. Принципиальная схема уравновешенного моста:

R_T – термпреобразователь сопротивления (ТПС),

R_1 – переменный резистор, R_1, R_2, R_3 – резисторы (плечи моста)

В диагональ питания bd , включен источник питания B . В измерительную диагональ ac , включен гальванометр G .

Изменяя значение сопротивления R_1 , можно добиться такого состояния мостовой схемы, при котором ток I_G , протекающий через гальванометр, будет равен 0, т.е. мост будет уравновешен, при этом

$$I_T = I_1; \quad I_2 = I_3; \quad I_T \cdot R_T = I_1 \cdot R_1; \quad I_2 \cdot R_2 = I_3 \cdot R_3 \quad (2.51)$$

Из этих равенств получим уравнение равновесия:

$$R_1 \cdot R_2 = R_T \cdot R_3. \quad (2.52)$$

Следовательно, условие равновесия для четырех плечевого уравновешенного моста можно сформулировать следующим образом: **произведение сопротивлений противоположных плеч моста должны быть равны между собой**. Значение сопротивления ТПС равно:

$$R_T = \frac{R_2}{R_3} \cdot R_1. \quad (2.53)$$

Из (2.53) видно, что уравновесить мост можно подбором R_1 , при постоянном отношении R_2/R_3 . Следовательно, каждому значению R_T ТПС будет соответствовать вполне определенное значение регулируемого сопротивления R_1 .

На практике применяют 3 схемы подключения ТПС в мостовую схему: 2-х проводную, 3-х проводную и 4-х проводную.

Количество проводов связано с погрешностью измеряемой t . Как правило, для соединения ТПС с измерительным прибором применяются медные провода, которые при изменении t окружающей среды изменяют свое сопротивление. Особенно это сказывается тогда, когда ТПС устанавливается на значительном расстоянии от измерительного прибора.

Для уменьшения или устранения влияния изменяющегося в процессе эксплуатации сопротивления соединенных проводов, на измеряемую t , и варьируют схемами подключения ТПС, включая провода в разные плечи мостовой схемы.

Двухпроводная схема подключения ТПС приведена на рис. 2.22.

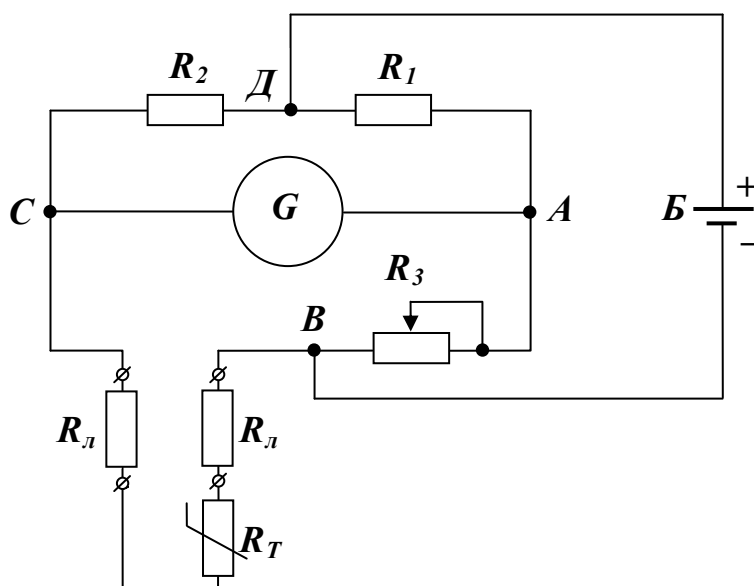


Рис. 2.22. Двухпроводная схема подключения ТПС:
 Б – батарея, R_T – ТПС, R_1, R_2, R_3 – резисторы (плечи моста),
 $R_{л}$ – резисторы для подгонки сопротивлений внешних линий

Если взять за основу уравнение равновесия (2.52), то можно доказать, что изменяя R_3 можно добиться равновесия мостовой схемы, констатируя отсутствие тока гальванометром G . Уравнение равновесия этой схемы имеет вид:

$$R_1 \cdot (R_T + 2 \cdot R_{л}) = R_2 \cdot R_3.$$

Поделим левую и правую части уравнения на R_1 . Тогда получим:

$$R_T + 2 \cdot R_{л} = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3$$

или

$$R_T = \frac{R_2}{R_1} \cdot R_3 - 2 \cdot R_L. \quad (2.54)$$

Так как $R_1, R_2, R_L = \text{Const}$, то можем записать, что

$$R_T = f(R_3). \quad (2.55)$$

Точность измерения по методу уравновешенного моста при двухпроводной схеме включения ТПС достаточно высока и практически не зависит от величины напряжения батареи B . Это понятно из уравнения (2.54), так как ни I ни U не входят в данное уравнение.

Неточность в работу этой схемы могут внести переходное сопротивление подвижного контакта сопротивления R_3 , а также изменение сопротивления соединительных проводов за счет изменения температуры окружающей среды. Эти недостатки отчасти исключаются при трехпроводной схеме подключения ТПС.

Трехпроводная схема подключения ТПС приведена на рис. 2.23.

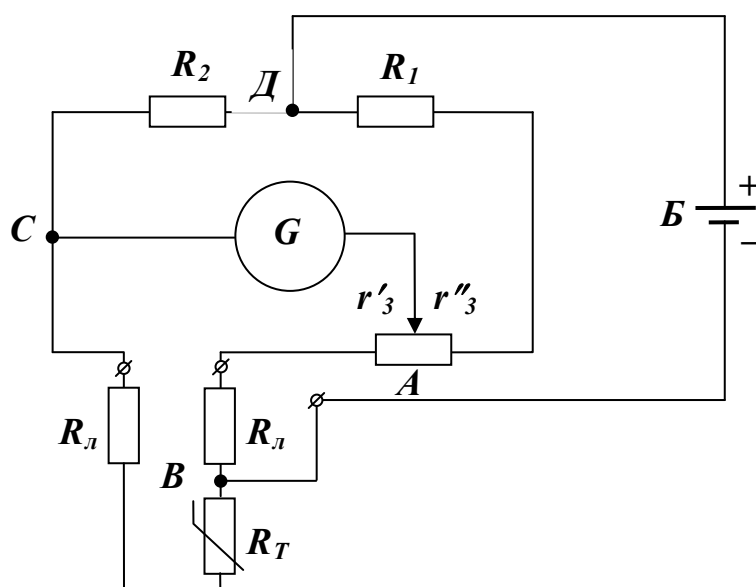


Рис. 2.23. Трехпроводная схема подключения ТПС

В данной схеме подвижный контакт не относится к плечу моста AB , а включен в измерительную диагональ AC , сопротивление которой в момент отсчета при нулевом токе практически не имеет значения. Для уменьшения влияния температуры окружающей среды на сопротивление соединительных проводов питание моста перенесено непосредственно к ТПС.

Уравнение равновесия этой схемы имеет вид:

$$(R_1 + r_3'') \cdot (R_T + R_L) = R_2 \cdot (R_L + r_3')$$

или

$$R_T = \frac{R_2}{R_1 + r_3''} \cdot r_3'' + \left(\frac{R_2}{R_1 + r_3''} - 1 \right) \cdot R_L. \quad (2.56)$$

Из уравнения (2.56) видно, что при $\frac{R_2}{R_1 + r_3''} = 1$ сопротивление ТПС не зависит от R_L . Такое положение схемы будет соответствовать лишь одной точке шкалы. В других точках изменение R_L будет вносить дополнительную погрешность, но на порядок меньшую, чем при двухпроводной схеме, так как R_1 и R_2 значительно больше чем r_3'' ($r_3''_{max} \approx R_3$).

Четырехпроводные схемы включения ТПС приведены на рис. 2.24 и 2.25. Для подсоединения ТПС в мостовую схему используют компенсационную схему с двумя парами соединительных проводов.

В схеме (рис. 2.24) ТПС и два провода образуют плечо моста $R_2 = R_T + 2R_L$, другое плечо состоит из постоянного сопротивления R_0 и двух одинаковых проводов, т.е. $R_4 = R_0 + 2R_L$.

Уравнение равновесия этой схемы имеет вид:

$$R_1 \cdot (R_0 + 2 \cdot R_L) = R_3 \cdot (R_T + 2 \cdot R_L). \quad (2.57)$$

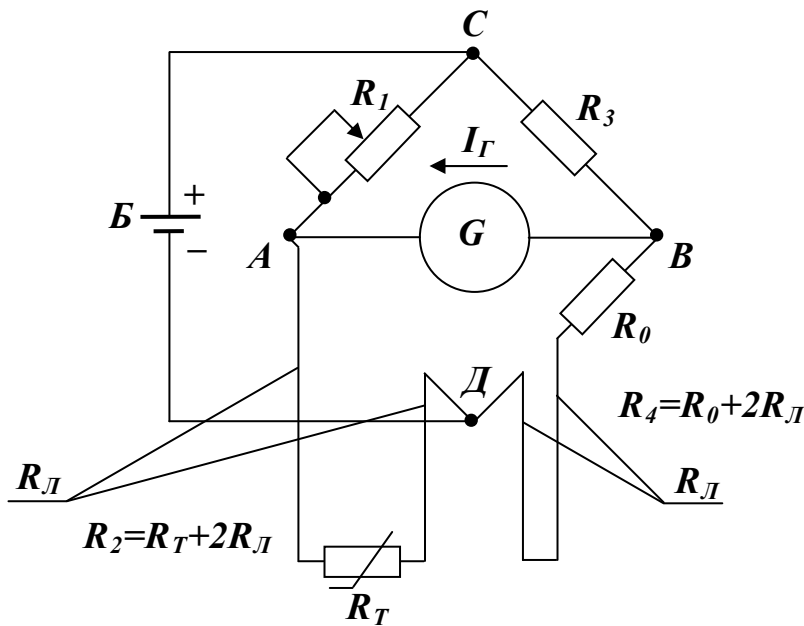


Рис. 2.24. Четырехпроводная компенсационная схема включения ТПС

Из уравнения равновесия видно, что R_L будут по обе стороны от знака равенства. Следовательно, изменение сопротивления соединительных проводов будут компенсировать друг друга.

Скомпенсировать влияние соединительных проводов можно при четырехпроводном включении ТПС с использованием нулевого метода.

В схеме (рис. 2.24) значение сопротивления R_T определяется по двум последовательным уравниваниям моста при двух различных включениях проводов. При первом уравнивании концы проводов соединяют согласно следующей маркировке: A к a ; D к f ; F к b . Мост уравнивают с помощью резистора R_1 , переменное сопротивление которого в положении равновесия $R_1 = R_1'$, т.е. уравнение равновесия будет иметь вид:

$$R_0 \cdot (R_1' + 2 \cdot R_L) = R_0 \cdot (R_T + 2 \cdot R_L). \quad (2.58)$$

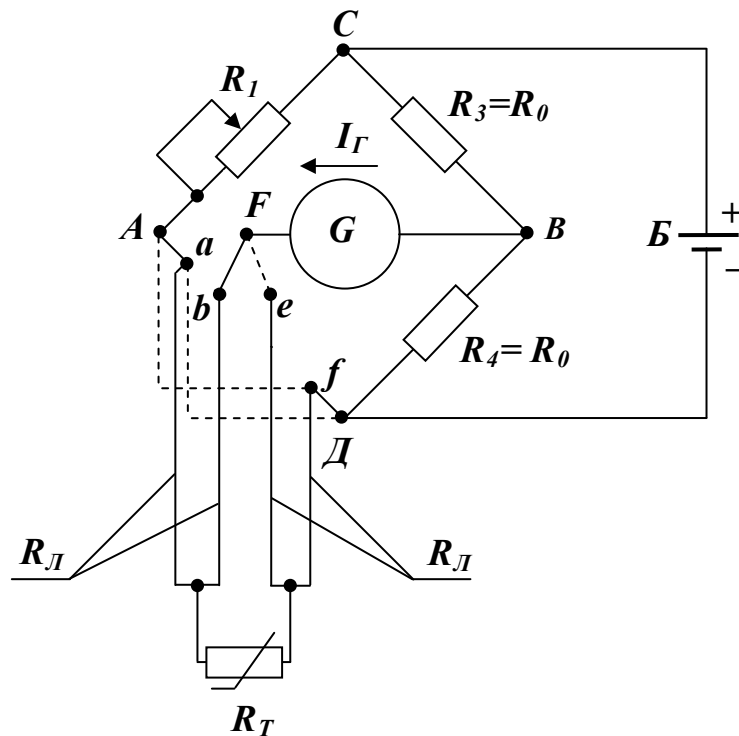


Рис. 2.25. Четырехпроводная схема включения ТПС по нулевому методу

При втором уравнивании моста концы проводов переключаются следующим образом: A к f ; D к a ; F к e . При этом $R_1 = R_1''$ и уравнение равновесия примет вид:

$$R_0 \cdot (R_1'' + 2 \cdot R_L) = R_0 \cdot (R_T + 2 \cdot R_L). \quad (2.59)$$

Сопротивление R_T ТПС вычисляется по результатам двух уравниваний схемы, как среднее арифметическое:

$$R_T = \frac{R_1' + R_1''}{2}. \quad (2.60)$$

2.17. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ МОСТЫ

Автоматические мосты предназначены для измерения температуры в комплекте с ТПС стандартной градуировки. Чаще всего автоматические мосты бывают показывающие и регистрирующие.

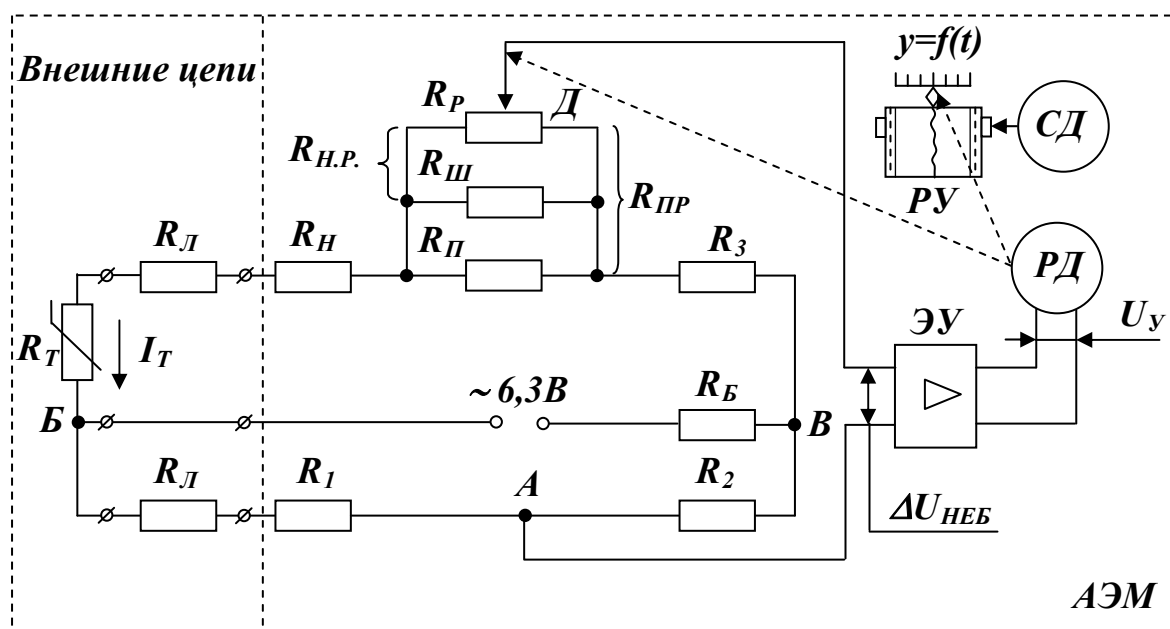


Рис. 2.26. Измерительная схема автоматического электронного моста

На рис. 2.26 приняты следующие обозначения: R_P – реохорд,

$R_{Ш}$ – шунт реохорда, предназначенный для подгонки сопротивления реохорда до нормированного значения, $R_{HP} = \frac{R_P \cdot R_{Ш}}{R_P + R_{Ш}}$ – нормированное значение реохорда,

$R_{П}$ – резистор для установки верхнего предела измерения, $R_{ПП} = \frac{R_{HP} \cdot R_{П}}{R_{HP} + R_{П}}$ – приведенное сопротивление реохорда,

хорда,

R_H – резистор для установки нижнего предела измерения моста, R_1, R_2, R_3 – постоянные резисторы, плечи моста, R_B – балластный резистор в цепи питания, предназначенный для ограничения тока в плечах моста и обеспечения минимального значения I_T ($I_T = 5 \div 10$ мА, в противном случае возникает погрешность от самонагрева), $R_L \approx 2,5$ Ом, со-

противление внешних линий, *РД* – реверсивный двигатель, *СД* – синхронный двигатель, предназначенный для передвижения диаграммы, *ЭУ* – электронный усилитель.

Условие равновесия мостовой схемы, есть отсутствие напряжения в измерительной диагонали *АД*, т.е. $\Delta U_{\text{НЕБ}} = 0$, или произведение сопротивлений противоположных плеч моста должны быть равны между собой. Уравнение равновесия измерительной схемы автоматического моста будет иметь вид:

$$(R_1 + R_L) \cdot (R_3 + m \cdot R_{\text{ПР}}) = R_2 \cdot [R_T + R_L + R_H + (1 - m) \cdot R_{\text{ПР}}]. \quad (2.61)$$

где $mR_{\text{ПР}}$ – приведенное сопротивление реохорда правее движка *Д*.

При изменении температура измеряемой среды изменяется значение сопротивления R_T , нарушается равновесие мостовой схемы, т.е. $\Delta U_{\text{НЕБ}} \neq 0$. На вход *ЭУ* поступает напряжение небаланса $\Delta U_{\text{НЕБ}}$, усиливается по мощности и напряжению и в виде напряжения U_y поступает на управляющую обмотку *РД*. *РД* вращаясь в соответствующую сторону, перемещает одновременно стрелку (перо) *РУ* и движок реохорда, меняя значение $R_{\text{ПР}}$ до тех пор, пока $\Delta U_{\text{НЕБ}} = 0$.

Типы автоматических мостов КММ – комплекс показывающих и КСМ1(2,3,4) – комплекс самопишущих приборов, А100Н, Диск 250, Технограф 100(160). Класс точности автоматических мостов по показаниям равен 0,25; 0,5.

2.18. НАЗНАЧЕНИЕ, УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЛОГОМЕТРА

Логометры предназначены для измерения температуры в комплекте с ТПС стандартной градуировки. Логометры – приборы магнитоэлектрической системы, подвижная система которых состоит из двух жестко скрепленных между собой рамок, расположенных под некоторым углом друг к другу. Выполняемые функции: показания, регулирование, сигнализация.

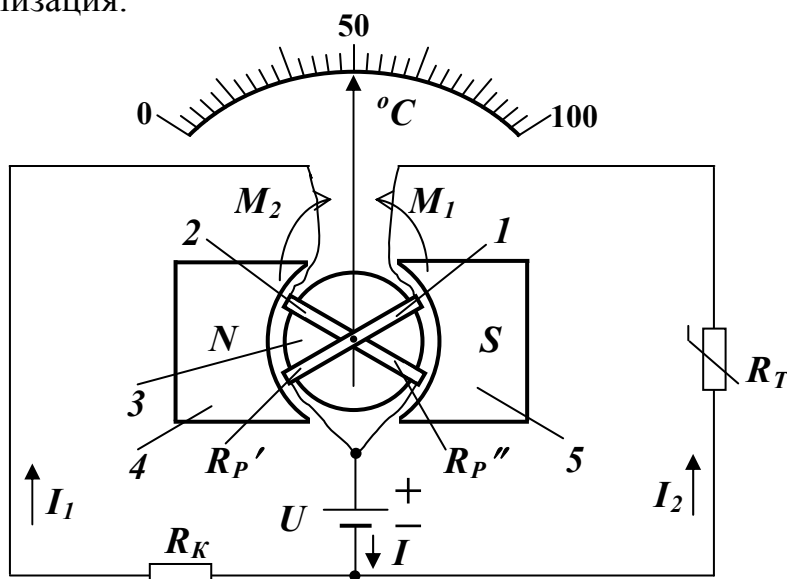


Рис. 2.27. Упрощенная принципиальная схема логометра:

1,2 – рамки логометра с сопротивлениями R_p' и R_p'' ; 3 – цилиндрический стальной сердечник; 4,5 – полюса постоянного магнита; R_k – постоянный резистор, включенный параллельно с R_p'' ; R_T – ТПС, включенный параллельно с R_p'

Между полюсами магнита и стальным сердечником существует неравномерный воздушный зазор, поэтому магнитная индукция в зависимости от положения рамок меняется, т.е. уменьшается при удалении рамок от центра магнита. Оба контура питаются от одного источника напряжения, поэтому колебания напряжения источника питания в пределах $\pm 20\%$ не влияют на показания прибора, т.е. изменение напряжения питания в пределах $\pm 20\%$ не дает погрешности измерения температуры.

Вращающие моменты рамок M_1 и M_2 равны:

$$M_1 = K_1 \cdot B_1 \cdot I_1; \quad M_2 = K_2 \cdot B_2 \cdot I_2; \quad (2.62)$$

где $K_1 = K_2 = \omega \cdot \ell \cdot b$ – постоянные коэффициенты, определяемые числом витков ω и геометрическими размерами рамок ℓ и b ;

B_1, B_2 – магнитные индукции в местах расположения рамок;

$I_1 = \frac{U}{R_k + R_p''}$, $I_2 = \frac{U}{R_T + R_p'}$ – токи, протекающие по соответствующим контурам.

В момент равновесия вращающие моменты равны между собой

$$K_1 \cdot B_1 \cdot I_1 = K_2 \cdot B_2 \cdot I_2, \quad (2.63)$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{K_2}{K_1} \cdot \frac{B_2}{B_1} = K \cdot \frac{B_2}{B_1}.$$

Подставив в это уравнение значения I_1 и I_2 , получим:

$$\frac{R_p'' + R_T}{R_p' + R_k} = K \cdot \frac{B_2}{B_1}.$$

Так как магнитная индукция B зависит от угла поворота подвижной части логометра φ , т.е. $B = f(\varphi)$, то и отношение $\frac{B_2}{B_1} = f(\varphi)$.

Следовательно,

$$\varphi = f\left(\frac{R_p' + R_T}{R_p'' + R_k}\right).$$

Значения $R_K, R_P', R_P'' = \text{Const}$, поэтому φ зависит только от значения сопротивления R_T , т.е.

$$\varphi = f(R_T). \quad (2.64)$$

Принцип действия. Если $R_P' = R_P''$ и $R_K = R_T$, то $I_1 = I_2$, следовательно, и $M_1 = M_2$, при этом подвижная система находится в среднем положении. Предположим t стала больше t_{CP} . В этом случае сопротивление R_T увеличится, I_2 уменьшится, а $M_1 < M_2$. Подвижная система начинает двигаться вправо по схеме, при этом рамка 2 входит в зазор с меньшей магнитной индукцией, а рамка 1 входит в зазор с большей магнитной индукцией. Движение подвижной системы будет происходить до тех пор, пока вновь $M_1 = M_2$ за счет изменения магнитных индукций.

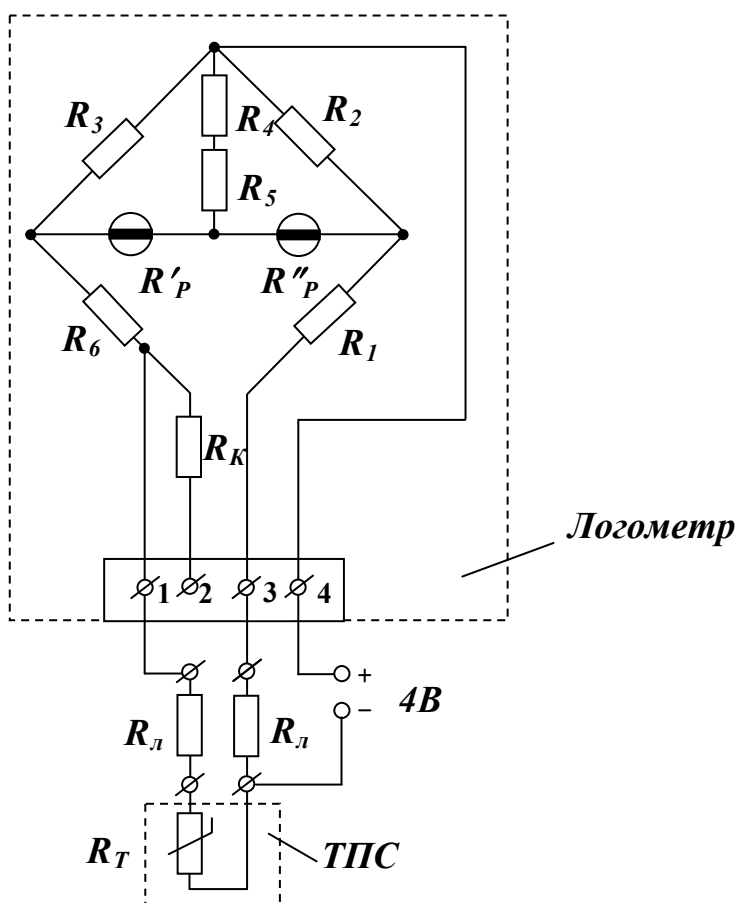


Рис. 2.28. Полная принципиальная схема логометра

Для повышения чувствительности в схемах логометра рамки R_P' и R_P'' включаются в измерительную диагональ неуравновешенного моста, состоящего из постоянных манганиновых сопротивлений R_1, R_2, R_3 и R_6 . Манганиновый резистор R_4 служит для увеличения угла поворота подвижной системы, а медный резистор R_5 служит для температурной компенсации. Сопротивления для подгонки внешних линий ло-

гометра $R_L \approx 2,5$ Ом, так как суммарное сопротивление внешних линий логометра составляет 5 Ом. Калиброванное сопротивление R_K , предназначено для контроля правильности подгонки сопротивлений R_L и исправности самого логометра. Для этого клеммы 1 и 3 закорачивают, а питание подают на клемму 2, при этом стрелка логометра должна установиться на красную контрольную отметку.

Типы логометров Л-64, Л-64-02, МВУ6-42, Ш69000 и т.п. Класс точности логометров равен 1,5.

2.19. НОРМИРУЮЩИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Нормирующие измерительные преобразователи предназначены (НИП) для преобразования выходного сигнала термоэлектрических преобразователей и термопреобразователей сопротивления в унифицированный сигнал постоянного тока $I_{ВЫХ} = 0 \div 5, 0 \div 20, 4 \div 20$ мА или напряжения $0 \div 10$ В.

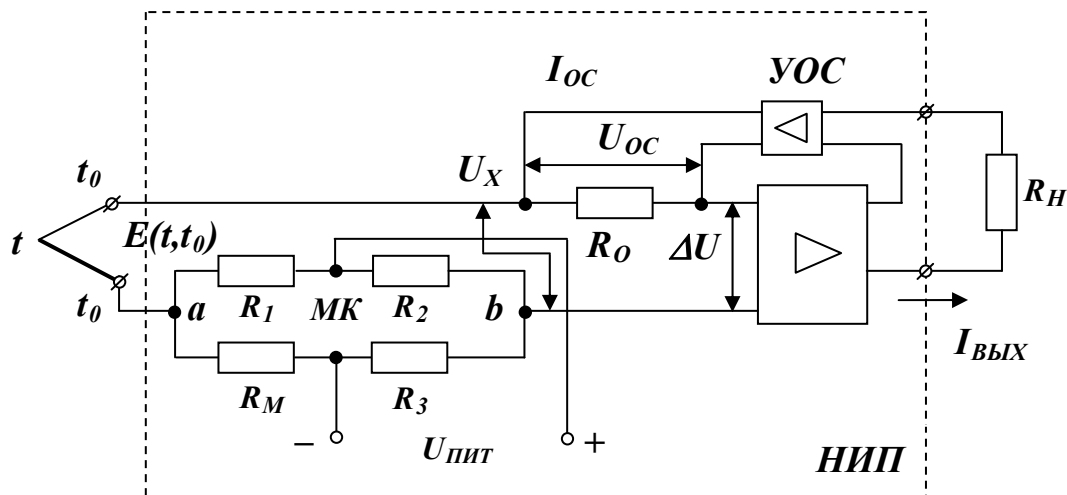


Рис. 2.29. Принципиальная схема нормирующего измерительного преобразователя для работы в цепи с ТЭП

В данной схеме сопротивление нагрузки $R_H = 2,5$ кОм представляет собой не что иное, как измерительный прибор, например, типа КПУ, КСУ, А100, т.е. прибор с унифицированным входным токовым сигналом, регулятор или контроллер.

Преобразователь состоит из корректирующего моста $МК$, усилителя с токовым выходом $I_{ВЫХ}$, устройства обратной связи ($УОС$) и резистора обратной связи $R_{ОС}$. Резисторы $МК$ выполнены из манганина, за исключением R_M , который изготовлен из меди, располагается вблизи холодных концов ТЭП и вносит автоматически поправку на температуру свободных концов ТЭП, т.е. на t_0 .

Преобразователь выполнен по статической автокомпенсационной схеме. Выходной сигнал ТЭП, скорректированный напряжением U_{ab} , снимаемым с вершин моста ab в виде напряжения

$$U_x = E(t, t_0) + U_{ab},$$

сравнивается с напряжением обратной связи U_{oc} . Не скомпенсированный сигнал

$$\Delta U = U_x - U_{oc}$$

усиливается усилителем с токовым выходом.

Выходной ток $I_{ВЫХ}$ поступает во внешнюю цепь R_H и через делитель подается в $УОС$. Токи на выходе и входе $УОС$ строго пропорциональны между собой. Выходной ток устройства обратной связи I_{oc} создает на R_{oc} сигнал обратной связи

$$U_{oc} = I_{oc} \cdot R_{oc} = K_{oc} \cdot R_{oc} \cdot I_{ВЫХ},$$

где K_{oc} – коэффициент передачи устройства обратной связи.

Для усилителя с обратной связью

$$\Delta I_{ВЫХ} = K_y \cdot (\Delta U - K_{oc} \cdot R_{oc} \cdot \Delta I_{ВЫХ}), \quad (2.65)$$

где K_y – коэффициент передачи усилителя.

Преобразуя уравнение (2.65) относительно $I_{ВЫХ}$, получим:

$$\Delta I_{ВЫХ} = \frac{K_y}{1 + K_y \cdot K_{oc} \cdot R_{oc}} \cdot \Delta U = K \cdot \Delta U, \quad (2.66)$$

где K – коэффициент передачи всего НИП.

Отношение $\frac{K_y}{1 + K_y \cdot K_{oc} \cdot R_{oc}} = \text{Const}$. При большом значении

K_y , т.е. при $K_y \rightarrow \infty$, коэффициент передачи всего НИП будет равен

$K = \frac{1}{K_{oc} \cdot R_{oc}}$, а его стабильность будет определяться стабильностью

K_{oc} и R_{oc} .

Типы НИП для работы в цепи с ТЭП: Ш-78, Ш-705, П-282, Ш9322, ИП-Т10 и т.п.

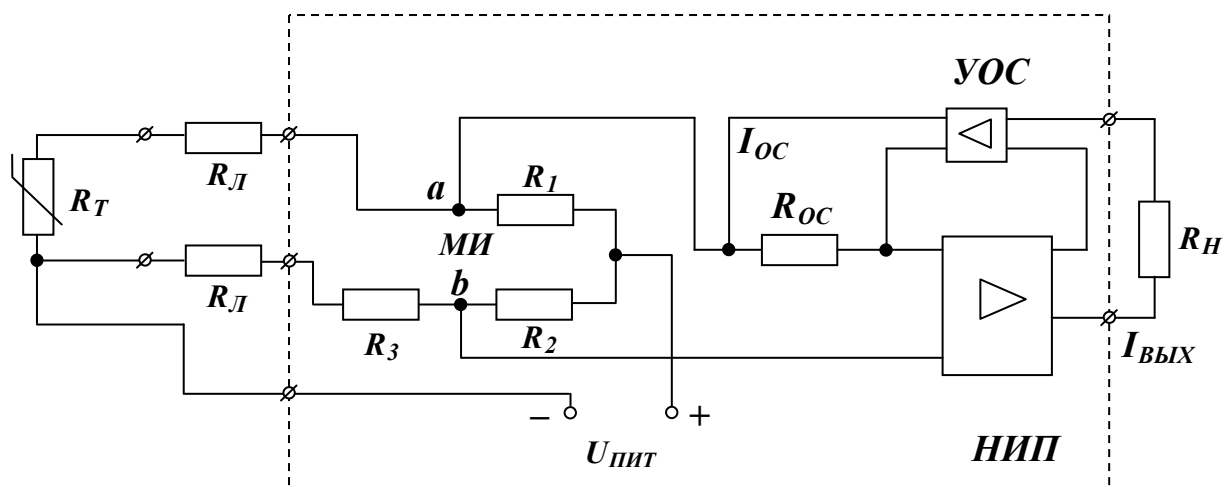


Рис. 2.30. Принципиальная схема нормирующего измерительного преобразователя для работы в цепи с ТПС

Преобразователь выполнен по статической автокомпенсационной схеме. Состоит из моста измерительного (*МИ*), усилителя с токовым выходом $I_{\text{ВЫХ}}$, устройства обратной связи (*УОС*) и резистора обратной связи $R_{\text{ОС}}$. Мост измерительный *МИ* работает в неуравновешенном режиме, предназначен для преобразования изменения R_T в напряжение постоянного тока U_M , снимаемого с вершин моста *ab*. Питание мостовой схемы осуществляется от источника питания стабилизированного. ТПС подсоединен по трех проводной схеме. Дальнейший принцип преобразования выходного напряжения мостовой схемы такой же, как и у предыдущего преобразователя.

Типы НИП для работы в цепи с ТПС: Ш-79, Ш-703, П-282Л, Ш9221, ИП-С10 и т.п. Предел основной допускаемой приведенной погрешности НИП колеблется от $\pm 0,25\%$ до $\pm 1,5\%$.

2.20. ПИРОМЕТРЫ ИЗЛУЧЕНИЯ

Принцип действия пирометров излучения основан на использовании теплового излучения нагретых тел. По сравнению с другими приборами, предназначенными для измерения температуры, пирометры излучения имеют некоторые преимущества. Во-первых, измерение основано на бесконтактном методе, а верхний предел измерения температуры теоретически не ограничен. Во-вторых, имеется возможность измерения температур пламени и высоких температур газовых потоков при больших скоростях, когда невозможно использовать контактные методы.

2.20.1. Теоретические основы измерения температуры по излучению

Тепловое излучение представляет собой процесс распространения внутренней энергии излучаемого тела электромагнитными волнами. При поглощении их другими телами они вновь превращаются в тепловую энергию. При увеличении температуры нагретого тела и изменении его цвета быстро возрастает спектральная энергетическая яркость (СЭЯ), т.е. излучения определенной длины волны, а также увеличивается суммарное (интегральное) излучение. В соответствии с этими свойствами пирометры излучения делятся на квазимонохроматические и пирометры полного излучения.

СЭЯ и интегральное излучение зависят от физических свойств нагреваемого тела, поэтому шкалы пирометров градуируются по излучению абсолютно черного тела (АЧТ), степень черноты которого $\varepsilon = 1$.

Для температур до 3000 К СЭЯ для АЧТ можно описать уравнением Вина

$$E_{0\lambda} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (2.67)$$

где $E_{0\lambda}$ – СЭЯ АЧТ для волны длиной λ ,

T – абсолютная температура тела,

C_1, C_2 – постоянные (константы) излучения, числовые значения которых зависят от принятой системы единиц.

$$C_1 = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2,$$

где h – постоянная Планка,

c – скорость света.

$$C_2 = \frac{N \cdot h \cdot c}{R},$$

где N – постоянная Авогадро,

R – универсальная газовая постоянная.

Для температур свыше 3000 К СЭЯ для АЧТ можно описать уравнением Планка

$$E_{0\lambda} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot \left(e^{-\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}. \quad (2.68)$$

Интегральное излучение АЧТ можно описать уравнением Стефана – Больцмана

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (2.69)$$

где E_0 – полная энергетическая яркость,

C_0 – константа излучения АЧТ,

T – абсолютная температура излучаемой поверхности.

Реальные физические тела излучают энергию менее интенсивно, чем АЧТ. В результате измерения пирометрами квазимонохроматического или полного излучения получают соответственно яркостную или условную температуру. Для перехода от яркостной температуры к реальной температуре используют преобразованное уравнение Вина для АЧТ

$$B_{0\lambda}(T_{\text{я}}) = K \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T_{\text{я}}}}, \quad (2.70)$$

где $B_{0\lambda}$ – яркость АЧТ для волны λ ,

$K = \frac{B_{0\lambda}(T_{\text{я}})}{E_{0\lambda}}$ – коэффициент пропорциональности,

$T_{\text{Я}}$ – яркостная температура АЧТ.

Преобразованное уравнение Вина для реального серого тела

$$B_{\lambda}(T) = \varepsilon_{\lambda} \cdot K \cdot C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}, \quad (2.71)$$

где ε_{λ} – степень черноты реального тела для данной длины волны λ ,
 T – реальная температура нагретого тела.

Преобразуя эти два уравнения относительно T , получим

$$T = \left(\frac{1}{T_{\text{Я}}} - \frac{\lambda}{C_2} \cdot \ln \frac{1}{\varepsilon_{\lambda}} \right)^{-1},$$

где $T_{\text{Я}}$ – яркостная температура реального тела, измеренная квазимонохроматическим пирометром.

Условная температура тела, измеряемая пирометром полного излучения, численно равна температуре АЧТ, при которой интегральное излучение обоих тел одинаково. Интегральное излучение АЧТ при совпадении его температуры с условной температурой ($T_{\text{У}}$)

$$E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T_{\text{У}}}{100} \right)^4.$$

Интегральное излучение реального тела, нагретого до температуры T

$$E_0 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Сравнив правые части уравнений с учетом, что $E_0 = E$, получим реальную температуру

$$T = T_{\text{У}} \cdot \sqrt[4]{\frac{1}{\varepsilon}},$$

где $\varepsilon = \frac{E}{E_0}$ – степень черноты реального тела для всех длин волн,

$T_{\text{У}}$ – условная температура, измеренная пирометром полного излучения.

Из-за трудности определения действительных ε и ε_{λ} реального тела, температурный контроль чаще всего выполняют по яркостной температуре $T_{\text{Я}}$ или условной $T_{\text{У}}$, т.е. без введения поправок на неполноту излучения.

Степень черноты ε для всех длин волн находится $0 < \varepsilon < 1$, поэтому температура, измеряемая пирометрами всегда меньше реальной, т.к. $\varepsilon_{\lambda} > \varepsilon$, следовательно, $T_{\text{Я}}$ ближе к действительной температуре, чем $T_{\text{У}}$.

2.20.2. Квазимонохроматические пирометры

Принцип действия квазимонохроматических пирометров основан на сравнении яркости монохроматического излучения двух тел: эталонного тела и тела, температуру которого измеряют. В качестве эталонного тела можно использовать нить лампы накаливания, яркость излучения которой регулируется. Наиболее распространенным прибором этой группы является оптический пирометр с исчезающей нитью, схема которого показана на рис. 2.31.

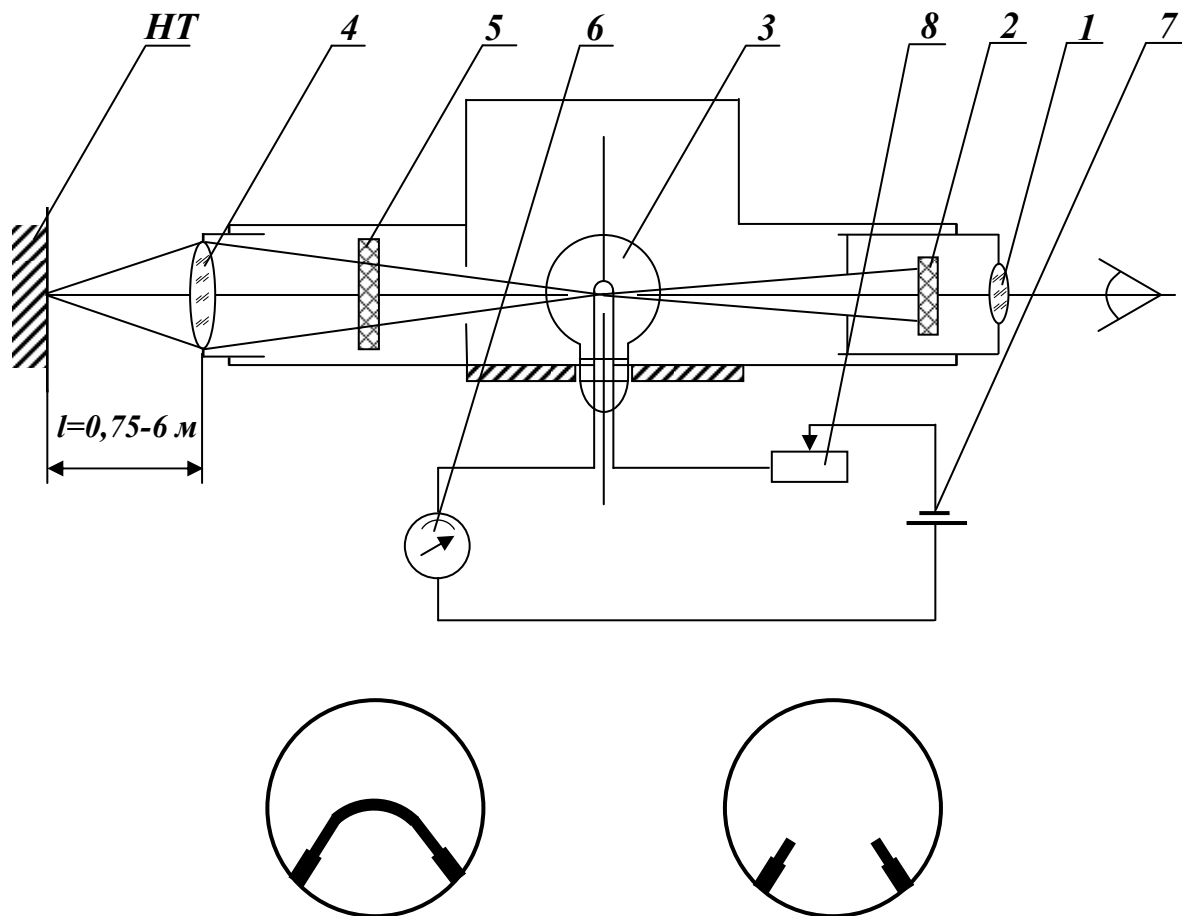


Рис. 2.31. Схема оптического пирометра с исчезающей нитью
HT – нагретое тело, 1 – линза объектива, 2 – красный светофильтр,
3 – лампа накаливания, 4 – линза окуляра, 5 – серый светофильтр,
6 – милливольтметр, 7 – источник питания, 8 – реостат

Пирометр представляет собой телескопическую трубку с линзами 1 и 4; внутри телескопической трубки в фокусе линзы 1 находится лампа накаливания 3 с подковообразной нитью. Лампа питается от аккумулятора 7 через реостат 8. В цепь питания лампы включен измерительный прибор 6, конструктивно объединенный с трубкой телескопа.

Шкала измерительного прибора отградуирована в °С. Для получения монохроматического света, окуляр снабжен красным светофильтром 2, пропускающим только лучи определенной длины волны. В окуляре находится серый поглощающий светофильтр 5, предназначенный для расширения пределов измерения и сохранения нити лампы накаливания от перегорания при температуре свыше 1400°С. Без серого поглощающего светофильтра 5 можно измерить температуру от 800°С до 1400°С, а от 1400°С до 6000°С вводится серый поглощающий светофильтр 5. Такие пирометры имеют две шкалы.

Для измерения температуры пирометр наводят на нагретое тело **НТ** и добиваются с помощью объектива четкого изображения нити лампы и **НТ**, при этом видна нить накаливания (рисунок I). Реостатом 8 регулируется яркость нити до тех пор, пока средняя ее часть не сольется с **НТ** (рисунок II). В этот момент по шкале измерительного прибора 6 отсчитываем $T_{я}$. Оптические пирометры работают с эффективной длиной волны $\lambda = 0,65 \pm 0,1$ мкм.

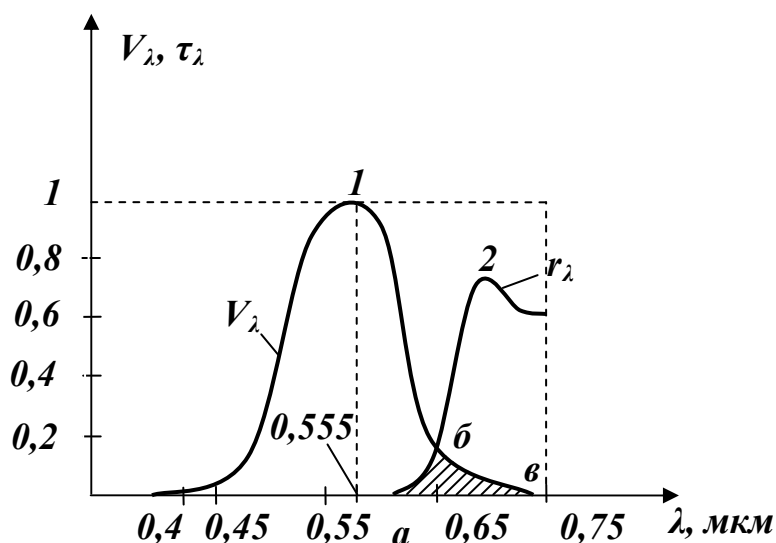


Рис. 2.32. Кривые спектральной чувствительности человеческого глаза (1) и пропускания красного светофильтра (2)

V_{λ} – относительная спектральная чувствительность среднего человеческого глаза, τ_{λ} – граница пропускания красного светофильтра

Красный светофильтр пропускает в основном длинные волны, а глаз может воспринимать излучение лишь в области – **абв**. С этим и связано, что оптические пирометры работают с $\lambda_{эф} = 0,65 \pm 0,1$ мкм.

Для оптических пирометров общего применения предел основной допускаемой абсолютной погрешности в зависимости от значения измеряемой температуры приведен в табл. 2.9.

Таблица 2.9.

Предел основной допускаемой абсолютной погрешности
оптических пирометров

Измеряемая температура °С	Допускаемая погрешность, Δ_θ , °С
800 ÷ 1200	±8
1200 ÷ 2000	±13
1500 ÷ 2500	±30
2500 ÷ 6000	±130

Значение Δ_θ по отношению к верхнему пределу измерения составляет 0,6 ÷ 2%, допускаемые вариации показаний пирометра не должны превышать $V_\theta = 0,5 \cdot \Delta_\theta$.

2.20.3. Радиационные пирометры

Радиационные пирометры (пирометры полного излучения) определяют температуру тела по плотности интегрального излучения лучей всех длин волн, теоретически $0 < \lambda < \infty$. Практически оптическая система радиационных пирометров ограничивает пропускание длинных волн.

Чувствительный элемент радиационного пирометра представляет собой термобатарею, состоящую из ряда последовательно соединенных миниатюрных термопар (рис. 2.33), спаи которых расплющены до тонкой металлической пластинки и покрыты сажей.

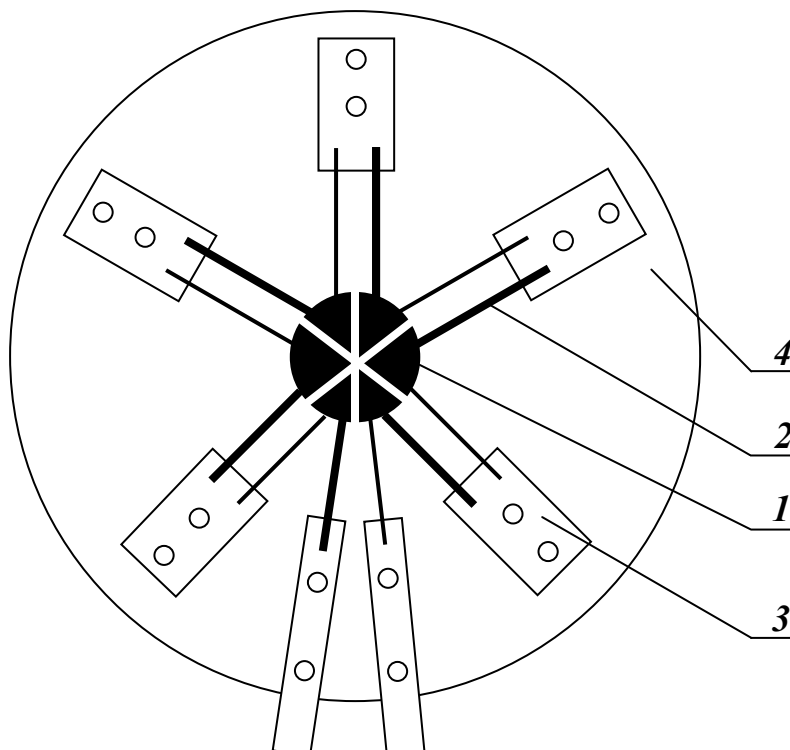


Рис. 2.33. Чувствительный элемент радиационного пирометра

1 – горячий спай термопары, 2 – термоэлектроды,
 3 – тонкие металлические соединительные пластинки,
 4 – слюдяная пластина

Чувствительный элемент находится в телескопе радиационного пирометра, оптическая система которого предназначен для концентрации измеряемого потока лучей (лучистой энергии) и передачи его на чувствительный элемент.

Существует две разновидности оптических систем рефракторная (преломляющая с линзой) и рефлекторная (отражающая с собирательным зеркалом).

Рефракторные оптические системы в промышленных измерениях температуры используются чаще, чем рефлекторные, так как собирательные зеркала быстро загрязняются и тускнеют.

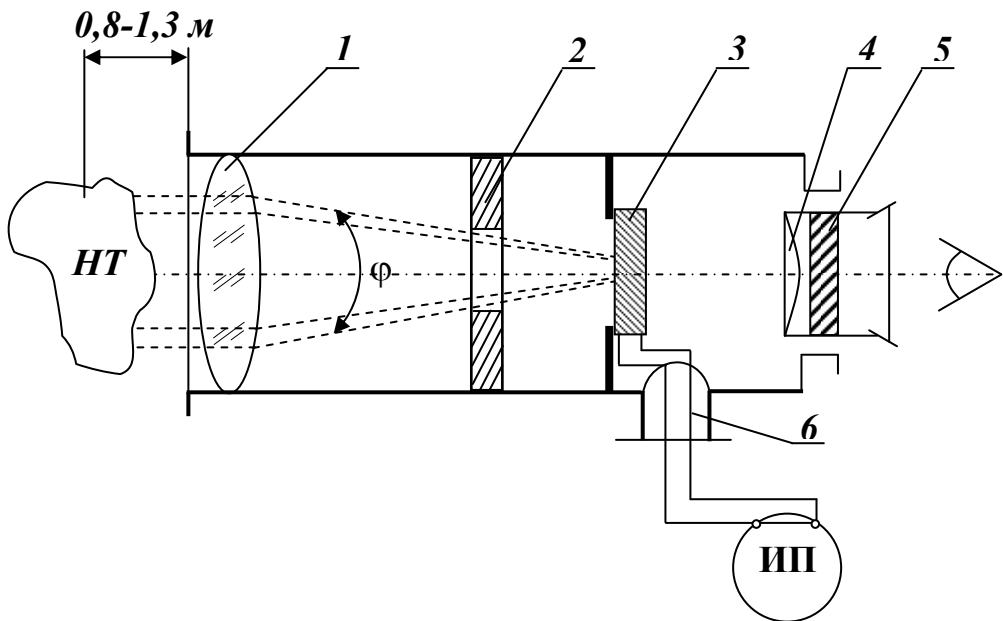


Рис. 2.34. Схема телескопа радиационного пирометра
 1 – линза, 2 – диафрагма, 3 – чувствительный элемент, 4 – окуляр,
 5 – красный светофильтр, ИП – измерительный прибор, НТ – нагретое тело

Телескоп с рефракторной оптической системой концентрирует лучистый поток после линзы 1 и диафрагмы 2, внутри конуса с углом φ . Рабочая часть приемника излучения (чувствительного элемента) 3 находится внутри конуса. Для наводки на **НТ** служит окуляр 4, закрытый красным светофильтром 5 для защиты глаза. ТЭДС, вырабатываемая термопарой, с помощью проводов от чувствительного элемента 3 передается к ИП (пирометрическому милливольтметру или автоматическому потенциометру). Точность измерения температуры с помощью радиационных пирометров существенно зависит от температуры холод-

ных концов ТЭП, которые находятся внутри телескопа. Для охлаждения телескопа, его помещают в специальные защитные устройства, которые в свою очередь охлаждаются воздухом или проточной водой.

Для компенсации температуры холодных концов термопар в радиационных пирометрах термобатарею шунтируют сопротивлением из никелевой или медной проволоки и устанавливают его в корпусе телескопа, чтобы температура холодных концов термобатареи и температура шунтирующего сопротивления совпали, т.е. $t_0 = t_{Ru}$.

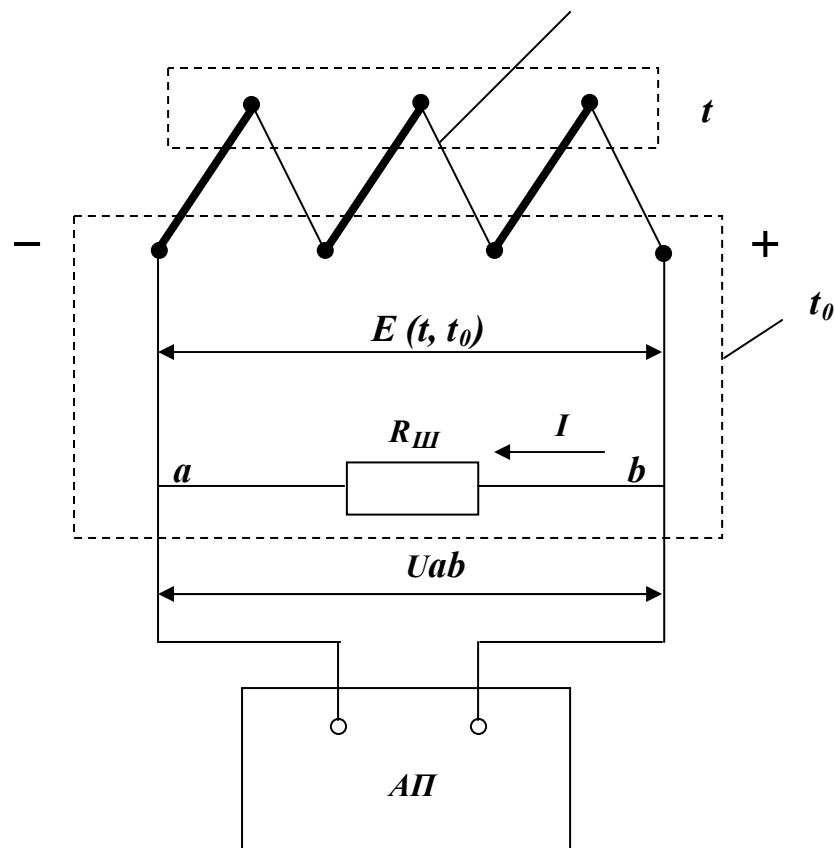


Рис. 2.35. Схема автоматического введения поправки на температуру холодных концов термобатареи

Получается замкнутая цепь, ток которой будет равен:

$$I = \frac{E(t, t_0)}{R_T + R_{ш}},$$

где $E(t, t_0)$ – ТЭДС, развиваемая термобатареей;

R_T – сопротивление термобатареи;

$R_{ш}$ – сопротивление шунтирующего резистора.

Ток I создает на участке ab падение напряжения

$$U_{ab} = I \cdot R_{III} = \frac{E(t, t_0)}{1 + \frac{R_T}{R_{III}}}$$

Так как $E(t, t_0) = f(T_y)$, то $U_{ab} = f(T_y)$.

Значение U_{ab} измеряется пирометрическим милливольтметром или автоматическим потенциометром.

Если температура холодных концов термобатареи увеличивается, т.е. $t_0' > t_0$, то результирующая ТЭДС термобатареи $E(t, t_0) = E(t, t_0) - E(t_0', t_0)$ уменьшается. Одновременно увеличивается значение R_{III} , тем самым увеличивается значение знаменателя, т.е. увеличивается U_{ab}

$$U_{ab}' = U_{ab} + \Delta U_{ab}, \quad \Delta U_{ab} = E(t_0', t_0).$$

Телескопы радиационных пирометров предназначены для измерения условной температуры. Температура измеряется с помощью хромель-копелевых термобатарей с НСХ РК-15, РС-20, РС-25, а также ни-хром-константановыми термобатареями с НСХ РК-20. Пределы допускаемых абсолютных погрешностей телескопа без учета погрешности милливольтметра или автоматического потенциометра не должны превышать значений приведенных в табл. 2.10.

Таблица 2.10

Пределы допускаемых абсолютных погрешностей телескопа радиационного пирометра

Измеряемая температура, °С	Допускаемые погрешности, Δt_0 , °С
500	±8
1000	±12
1500	±15
2000	±20
3000	±35

3. ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

3.1. Основные понятия

Давление характеризуется силой, равномерно распределенный по поверхности, а единица давления есть единица силы, действующая равномерно на единицу площади. Давление определяется частным от деления нормальной к поверхности силы на площадь этой поверхности:

$$P = \frac{N}{F}, \quad (3.1)$$

где P – давление;

N – нормальная сила, действующая на поверхность;

F – площадь поверхности.

За единицу давления в международной системе единиц СИ принята единица Н/м^2 равная давлению, вызванному силой в 1 Н, равномерно распределенной по поверхности в 1 м^2 . Эта единица называется Паскаль и обозначается Па. Временно допускаемая к применению единица давления – бар.

В России чаще всего приборы, предназначенные для измерения давления, градуируются в кПа или в МПа, а также в практической системе единиц кгс/м^2 или кгс/см^2 . Кроме того, в практике измерения давления используются и другие единицы измерения давления.

При выполнении расчетов, связанных с переводом давления из одной системы единиц в другую, рекомендуется пользоваться соотношениями, приведенными в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Соотношения между единицами давления

Единицы	Па	бар	кгс/м^2 , мм.вод.ст.	кгс/см^2	мм.рт.ст.
1 Па	1	10^{-5}	0,102	$10,2 \cdot 10^{-6}$	$7,5 \cdot 10^{-3}$
1 бар	10^5	1	$1,02 \cdot 10^4$	1,02	750.06
1 кгс/м^2 , мм.вод.ст.	9,807	$0.9807 \cdot 10^{-4}$	1	10^{-4}	$73,6 \cdot 10^{-3}$
1 кгс/см^2	98070	0.98066	10^4	1	735,6
1 мм.рт.ст.	133,3	$1,333 \cdot 10^{-3}$	13,6	$13,6 \cdot 10^{-4}$	1

При измерениях различают абсолютное, атмосферное, избыточное и вакуумметрическое давления.

Абсолютное давление – давление, значение которого при измерении отсчитывают от давления, значение которого равно нулю. Абсо-

лютное давление воздушной оболочки земли на ее поверхности называется атмосферным.

Избыточное P_u давление определяется разностью между абсолютным $P_{абс}$ и атмосферным $P_{атм}$ давлением, т. е.

$$P_u = P_{абс} - P_{атм}.$$

Если абсолютное давление меньше атмосферного, то избыточное давление отрицательное и называется вакуумметрическим или разрежением

$$P_{вак} = P_{атм} - P_{абс}.$$

По принципу действия приборы, предназначенные для измерения давления, делятся на:

- жидкостные, в которых измеряемое давление уравнивается давлением столба жидкости;
- деформационные, где измеряемое давление определяется по величине деформаций различных упругих чувствительных элементов или по развиваемой ими силе;
- грузопоршневые, в которых измеряемое давление уравнивается давлением, создаваемым массой поршня и грузов;
- электрические, действие которых основано на измерении электрических свойств некоторых материалов при воздействии давления.

Приборы для измерения атмосферного давления, называются барометрами, избыточного давления – манометрами, вакуумметрического давления – вакуумметрами, разности давлений – дифманометрами. Приборы, предназначенные для измерения малых давлений, разрежений, давлений и разрежений газовых сред (до 40 кПа) называются напоромерами, тягомерами и тягонапоромерами.

Устройство перечисленных измерительных устройств давления разнообразно. Среди них можно выделить группу механических измерительных приборов и четыре группы измерительных преобразователей, выпускаемых отечественной промышленностью: с дифференциально-трансформаторными преобразователями, с компенсацией магнитных потоков, с электросиловой компенсацией и с тензопреобразователями.

Манометры и дифманометры выпускаются многими отечественными заводами – это ПГ «Метран» (г. Челябинск); завод «Манометр», «Манометр-сервис», ВНИИА (г. Москва); «Манотомь», ЗАО «ФизТех» (г. Томск); «Орлекс» (г. Орел); «Теплоконтроль» (г. Казань); «Теплоприбор» (г. Рязань); «Саранский приборостроительный завод» (г. Саранск) и т. п.

3.2. ЖИДКОСТНЫЕ МАНОМЕТРЫ

В жидкостных манометрах измеряемое давление или разность давлений уравнивается гидростатическим давлением столба жидкости. В приборах используется принцип сообщающихся сосудов. Жидкостные манометры отличаются простотой устройства и повышенной точностью измерения. Применяются для поверки и калибровки приборов других систем, а также для технических измерений. В качестве рабочей жидкости используется спирт, ртуть и вода.

Двухтрубные жидкостные манометры. Для измерения давления и разность давлений используются двухтрубные манометры и дифманометры с видимым уровнем, часто называемыми U – образными. Принципиальная схема такого манометра приведена на рис. 3.1.

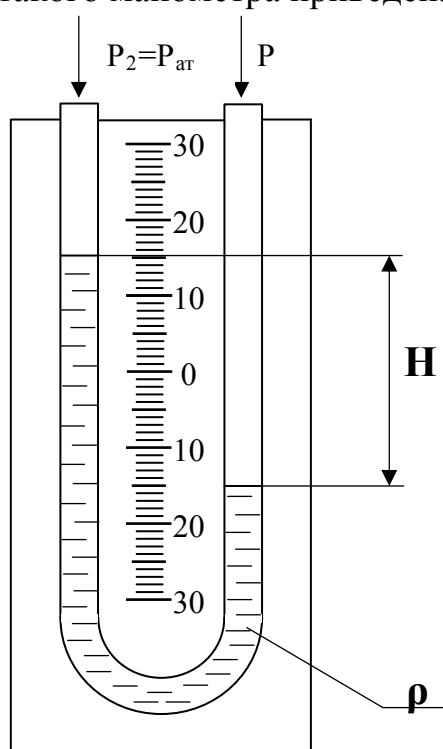


Рис. 3.1. Схема двухтрубного манометра

Двухтрубный манометр состоит из стеклянной U-образной трубки и доски со шкалой. В зависимости от соотношения давлений в правой и левой трубке изменяется уровень жидкости, которая показывает разницу уровней перепада давлений. Измеряемое избыточное давление, выраженное в Па, равно:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = H \cdot \rho \cdot g, \text{ Па}, \quad (3.2)$$

где H – разность уровней жидкости, в м;

ρ – плотность рабочей жидкости, в кг/м^3 ,

g – местное ускорение свободного падения, в м/с^2 .

Верхний предел измерения манометров с водяным заполнением составляет $1 \div 10$ кПа, предел допускаемой основной приведенной погрешности измерения лежит, соответственно, в интервале $2 \div 0,2$ %. Определение значения давления по шкале U-образного манометра производится по двум уровням и оба значения складываются. Принято, что погрешность каждого отсчета при этом составляет ± 1 мм.

Однотрубные (чашечные) манометры. Для повышения точности отсчета разности высот уровней используются однотрубные (чашечные) манометры, в которых одна из трубок заменена сосудом, диаметр которого минимум в 20 раз больше диаметра измерительной трубки. Принципиальная схема данного манометра приведена на рис. 3.2.

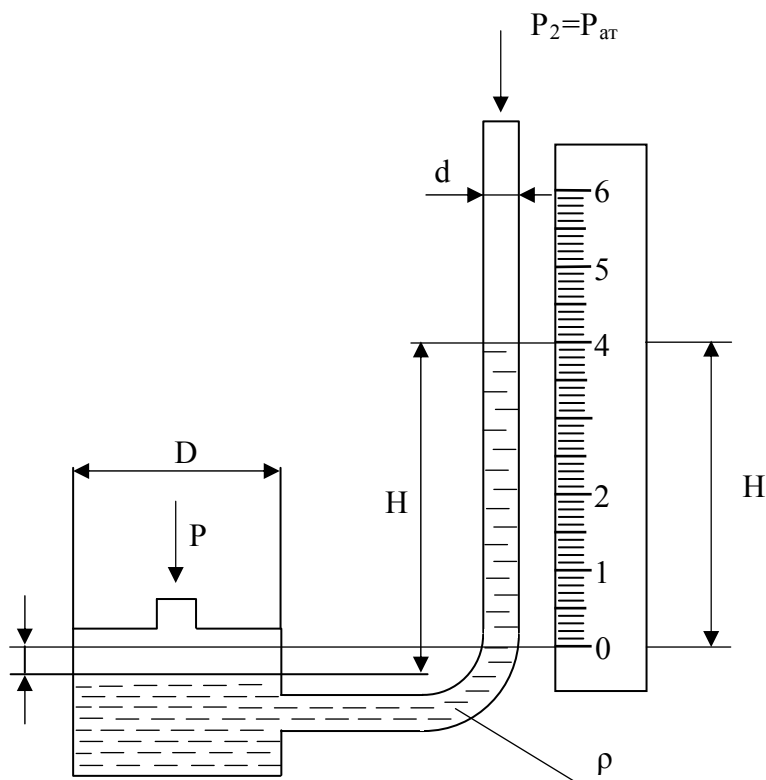


Рис. 3.2. Схема чашечного манометра

Под действием давления часть рабочей жидкости из широкого сосуда перетекает в измерительную трубку. Поскольку объем жидкости, вытесненный из широкого сосуда, равен объему жидкости, поступившему в измерительную трубку, то

$$H_1 = H_2 \cdot f/F,$$

а

$$H = H_1 + H_2 = H_2 \cdot \left(1 + \frac{f}{F} \right),$$

где f — площадь поперечного сечения измерительной трубки,
 F — площадь поперечного сечения широкого сосуда.

Так как $f \ll F$, следовательно, $H_1 \ll H_2$. Если $f/F = 1/400 = 0,0025$, то при измерениях учитывается изменение уровня в измерительной трубке, а изменением уровня в широком сосуде пренебрегают. Так как отношение $f/F \leq 0,0025$, поэтому производить отсчет без заметных погрешностей можно по одному уровню H_2 .

Измеряемое избыточное давление, выраженное в Па, в этом случае будет равно:

$$P = H_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \left(1 + \frac{f}{F}\right) = H_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \left(1 + \frac{d^2}{D^2}\right), \quad (3.3)$$

где d – диаметр измерительной трубки,

D – диаметр широкого сосуда.

Однотрубные манометры с водяным заполнением имеют верхний предел измерения $1,6 \div 10$ кПа. При этом предел допускаемой основной приведенной погрешности измерения лежит, соответственно, в интервале $0,4 \div 0,25$ %.

Чашечный микроманометр с наклонной трубкой типа ММН. Для измерения давления или разности давлений до 3 кПа (350 кгс/м^2) используются микроманометры. Принципиальная схема данного манометра приведена на рис. 3.3.

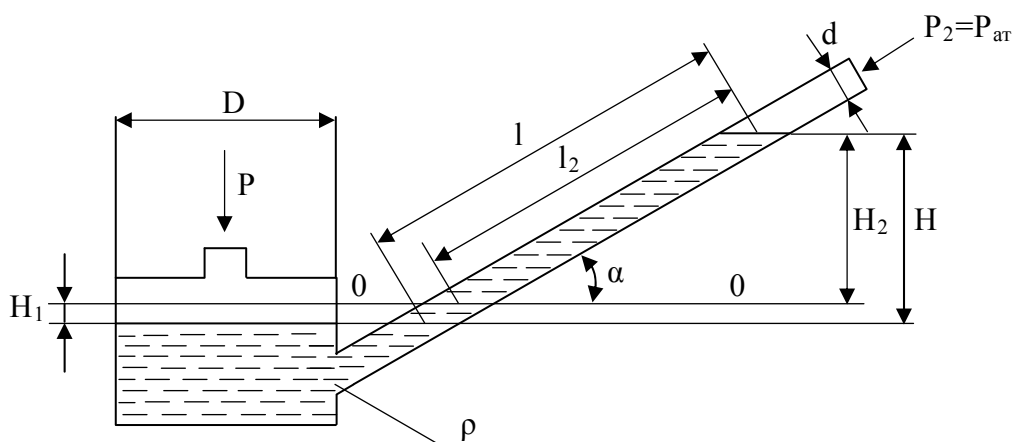


Рис. 3.3. Схема чашечного микроманометра

Высота столба жидкости в измерительной наклонной трубке будет равна:

$$H_2 = l_2 \cdot \sin \alpha,$$

где l_2 – перемещение уровня жидкости в трубке,

α – угол наклона трубки.

Учитывая уравнение неразрывности жидкости $H_1 \cdot F = l_2 \cdot f$, получим уравнение измеряемого избыточного давления, выраженного в Па:

$$P = P_1 - P_2 = H \cdot \rho \cdot g \cdot \left(\sin \alpha + \frac{f}{F} \right). \quad (3.4)$$

Из уравнения следует, что при $\sin \alpha < 1$ и $f/F \ll 1$ перемещение уровня жидкости в трубке во много раз превосходят высоту столба H , необходимую для уравнивания измеряемого давления. Поэтому измеряемое давление можно определить по выражению:

$$P = l_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \sin \alpha. \quad (3.5)$$

Из уравнения видно, что чем меньше α , тем меньше предел измерения прибора и больше растянуты деления шкалы. Это приводит к повышению чувствительности и предопределяет точность измерения. Предел допускаемой основной приведенной погрешности измерения микроманометра составляет $\pm 0,5\%$.

Чашка микроманометра заполняется этиловым спиртом с плотностью $0,8095 \text{ г/м}^3$. Угол наклона микроманометра можно изменять, передвигая трубку вдоль специального сектора.

Единство принципа действия жидкостных манометров обуславливает универсальность измерения давления любого вида:

- абсолютное давление, если $P_2 = 0$, то $P_{абс} = H \cdot \rho \cdot g$;
- избыточное давление, если $P_2 = P_{ам}$, а $P_1 > P_{ам}$, то $P_u H \cdot \rho \cdot g$;
- разность двух давлений $\Delta P = P_1 - P_2$.

Чувствительность жидкостных манометров – это отношение измерения показаний прибора к вызвавшему его изменению давления, т.е.

$$S = \frac{\Delta H}{\Delta P}. \quad (3.6)$$

Чувствительность U-образного манометра равна:

$$S = \frac{1}{\rho \cdot g}, \quad (3.7)$$

Чувствительность чашечного манометра равна:

$$S = \frac{1}{\rho \cdot g \cdot \left(1 + \frac{f}{F} \right)}. \quad (3.8)$$

Чувствительность микроманометра с наклонной трубкой равна:

$$S = \frac{\Delta l}{\Delta P} = \frac{1}{\rho \cdot g \cdot \left(\sin \alpha + \frac{f}{F} \right)}. \quad (3.10)$$

Из уравнений чувствительности следует, что она зависит от ρ . С другой стороны ρ определяет диапазон измерений. Чем больше плотно-

стью рабочей жидкости ρ , тем больше измеряемое давление. Таким образом, относительная погрешность отсчета от значения ρ не зависит. Поэтому для увеличения чувствительности, а, следовательно, и точности результата отсчета разработаны различные отсчетные устройства, которые позволяют производить отсчет с абсолютной погрешностью равной $\Delta = 0,1 \div 0,2$ мм. Диапазоны измерений жидкостных манометров в соответствии с уравнениями (3.2, 3.3, 3.5), определяются высотой столба жидкости H , т. е. размером манометра, и плотностью рабочей жидкости ρ .

3.3. УПРУГИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЕФОРМАЦИОННЫХ МАНОМЕТРОВ

Деформационные измерительные устройства широко применяются для измерения давления и перепада давления, благодаря простоте и большому диапазону измерения от нескольких Па до 1000 МПа.

Принцип действия данных устройств основан на уравнивании силы, создаваемой давлением измеряемой среды на упругий чувствительный элемент (УЧЭ) силами упругих деформаций различных по конструкции УЧЭ. Эта деформация в виде линейных или угловых перемещений передается показывающей или самопишущей части прибора. При снятии давления УЧЭ за счет упругой деформации возвращается в исходное положение. Структурная схема технического манометра приведена на рис. 3.4.

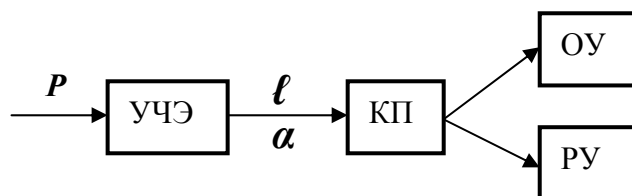


Рис. 3.4. Структурная схема манометра:

УЧЭ – упругий чувствительный элемент; КП – кинематическая передача;
 ОУ – отсчетное устройство; РУ – регистрирующее устройство

Перемещение УЧЭ может быть преобразовано в электрический или пневматический сигнал для дистанционной передачи его на измерительный прибор (ИП) или другое средство измерения или управления. В этом случае УЧЭ и устройство, преобразующее его перемещение в электрический сигнал, располагаются в одном корпусе, и эта конструкция называется первичным измерительным преобразователем давления. Структурная схема дистанционного манометра, состоящего из первичного измерительного преобразователя давления и ИП, приведена на рис. 3.5.

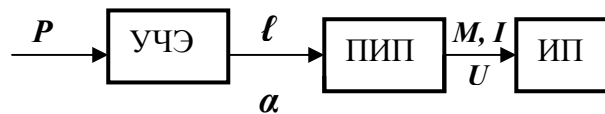
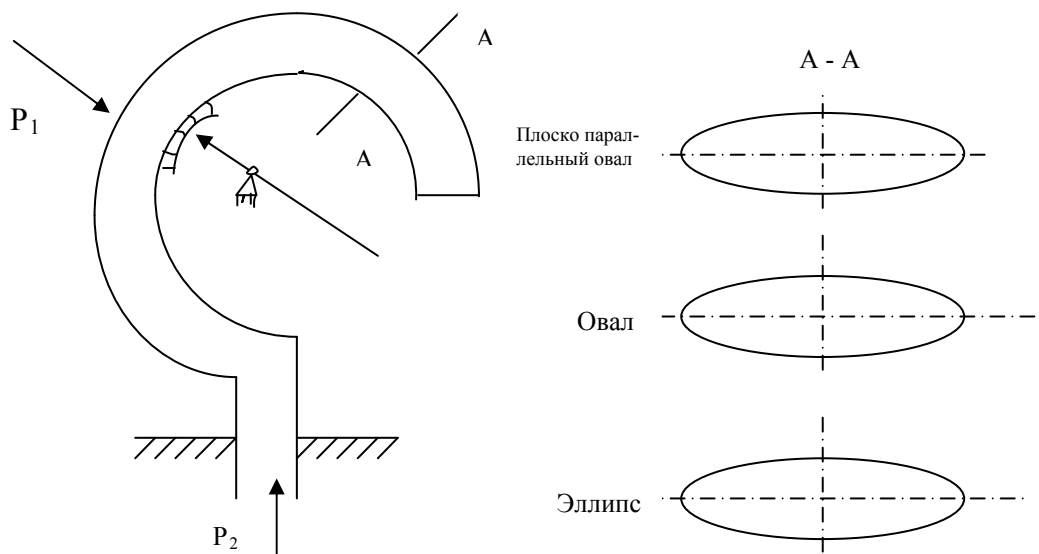


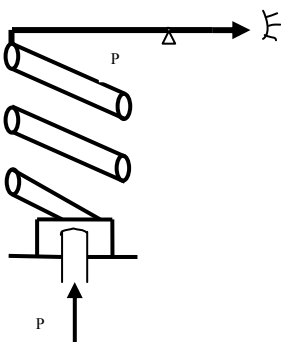
Рис. 3.5. Структурная схема дистанционного манометра:
 УЧЭ – упругий чувствительный элемент; ПИП – передающий измерительный преобразователь; ИП – измерительный прибор

В деформационных измерительных устройствах, предназначенных для измерения давления и перепада давления, в качестве УЧЭ (рис. 3.6) используются: одновитковая трубчатая пружина; многовитковая трубчатая пружина; упругая гофрированная мембрана; мембранная коробка; двойная (сдвоенная) мембранная коробка; пружинно – мембранные ЧЭ с вялой мембраной и сиффон.

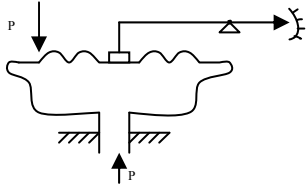
1. одновитковая трубчатая пружина



2. многовитковая трубчатая пружина

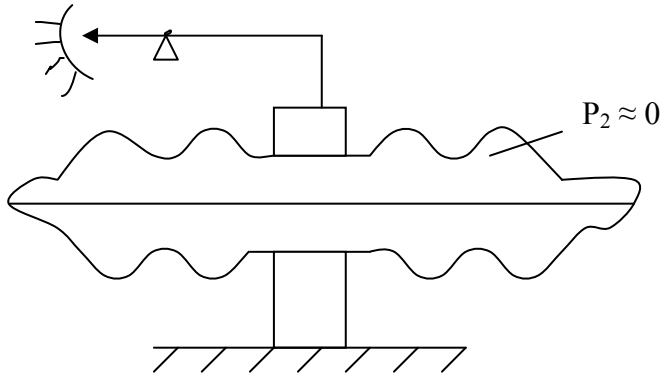


3. упругая гофрированная мембрана

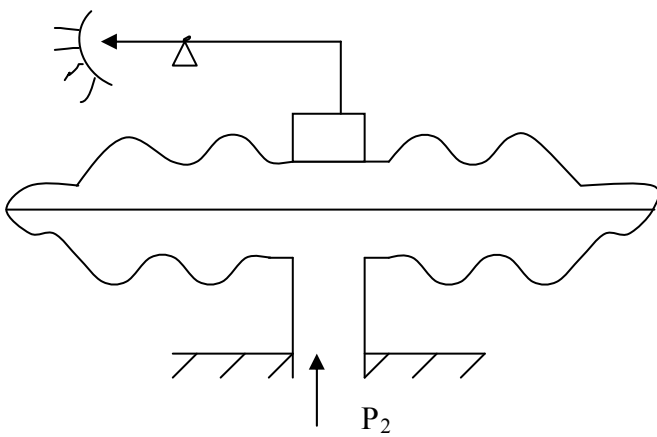


4. мембранная коробка

a)

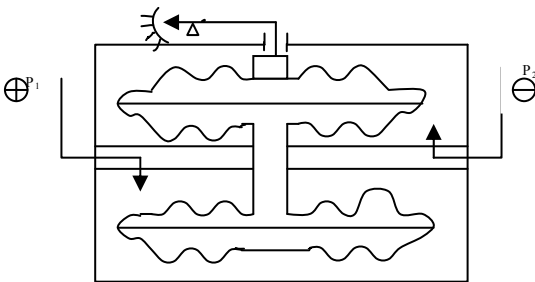


b)

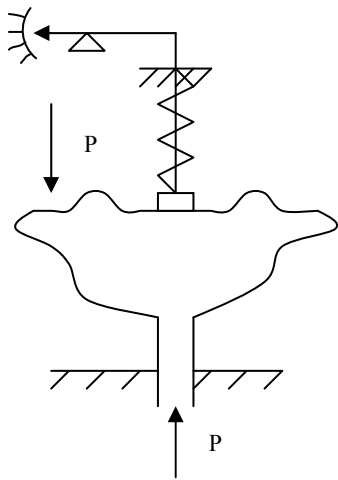


Измеряет напор и тягу

5. двойная (сдвоенная) мембранная коробка
также как и у обычных мембранных коробок, бывают двух типов.



6. пружинно – мембранные ЧЭ с вялой мембраной



7. сиффон

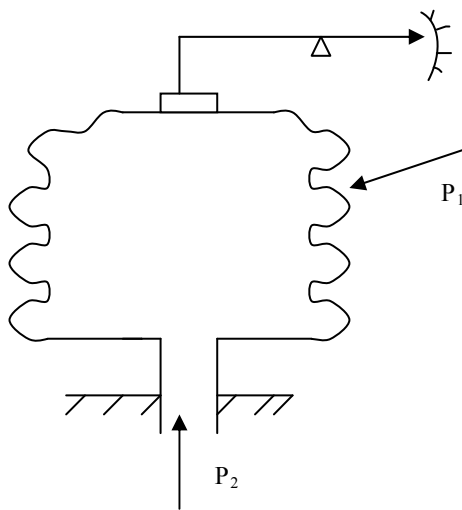


Рис. 3.6. Конструкции упругих чувствительных элементов

3.4. МАНОМЕТРЫ С ОДНОВИТКОВОЙ ТРУБЧАТОЙ ПРУЖИНОЙ

Наибольшее распространение в практике измерения избыточного давления нашли показывающие манометры (механические) с одновитковой трубчатой пружиной. Схема одновитковой трубчатой пружины и показывающий манометр с одновитковой трубчатой пружиной приведены на рис. 3.7.

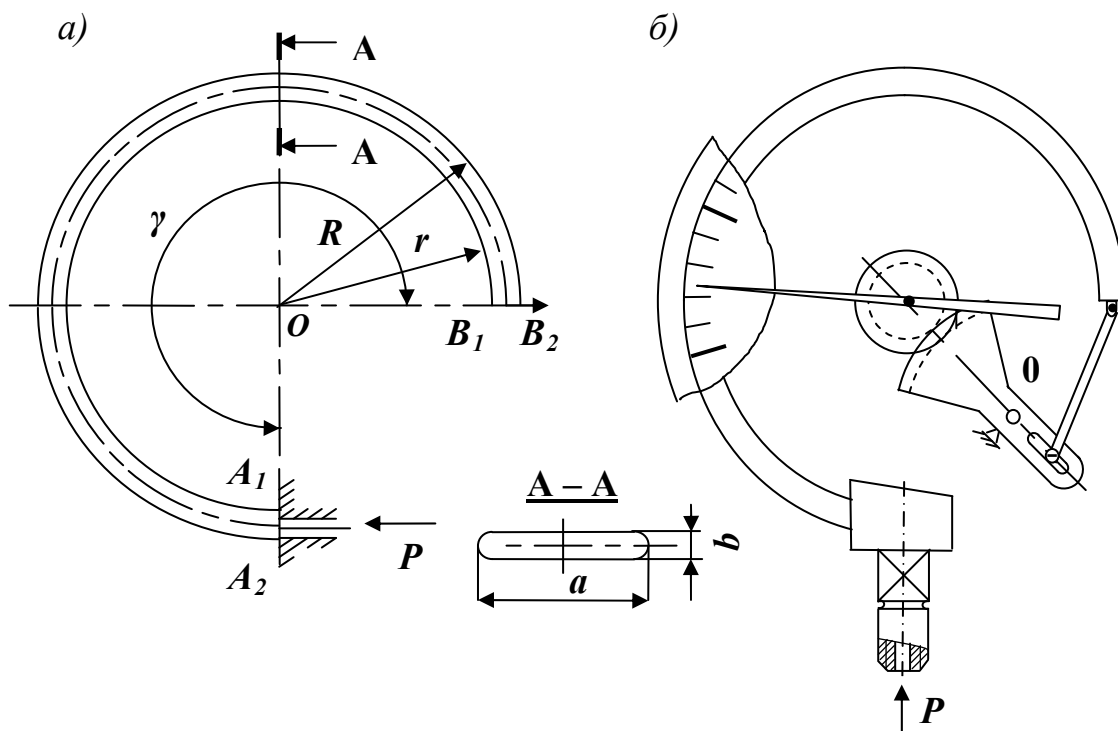


Рис. 3.7. Манометр с одновитковой трубчатой пружиной
 а) схема одновитковой трубчатой пружины, б) показывающий манометр с одновитковой трубчатой пружиной

Под действием P измеряемой среды одновитковая трубчатая пружина раскручивается, и ее свободный конец перемещается, вызывая перемещение стрелки.

Рассмотрим конструкцию чувствительного элемента манометра, выполненную в виде трубчатой пружины (рис. 3.7а).

Трубчатая пружина представляет собой изогнутую в виде дуги окружности полу трубку плоскоовального или эллиптического сечения. Один конец такой трубки неподвижно закреплен, а другой запаян и имеет возможность свободно перемещаться в пространстве.

Измеряемое давление подается во внутреннюю полость пружины, при этом ее свободный конец перемещается. При измерении избыточного давления пружина раскручивается, а при измерении разрежения – скручивается. Направление перемещения свободного конца трубки обусловлено увеличением малой оси сечения трубки под влиянием избыточного давления и уменьшением при воздействии разрежения. При этом длина трубки остается практически постоянной.

Трубка согнута по кругу под углом $\gamma \cong 270^\circ$. Трубка плоскоовального или эллиптического сечения под действием давления, действующего равномерно на стенки трубки стремится принять круглую форму, при этом малая ось эллипса b увеличивается, R увеличивается, r уменьшается, а большая ось a уменьшается. Тогда как длины дуг A_1B_1 и A_2B_2 остаются практически постоянными.

Если r – радиус OB_1 , R – радиус OB_2 , b – малая ось эллипса трубки, γ – угол закручивания трубки – размеры трубки до деформации давлением и соответственно r' , R' , b' и γ' – те же размеры после деформации, то будем иметь:

$$r \cdot \gamma = r' \cdot \gamma' \quad \text{и} \quad R \cdot \gamma = R' \cdot \gamma'. \quad (3.11)$$

Вычитая из второго выражения первое, получим:

$$(R - r)\gamma = (R' - r')\gamma'. \quad (3.12)$$

Так как $R - r = b$ и $R' - r' = b'$, то уравнение (3.12) примет вид:

$$b\gamma = b'\gamma'. \quad (3.13)$$

После деформации трубки $b' > b$, поэтому $\gamma' < \gamma$, т.е. под воздействием измеряемого давления трубчатая пружина манометра уменьшает свою кривизну, раскручиваясь в определенном направлении.

Обозначив изменение малой оси сечения и изменение угла закручивания трубки, соответственно, через

$$\Delta r = (R - r) - (R' - r'),$$

и

$$\Delta \gamma = \gamma - \gamma'.$$

Получим

$$\Delta \gamma = \frac{\Delta r}{R - r} \cdot \gamma.$$

Тогда перемещение конца трубки W будет связано с изменением начального угла γ соотношением:

$$W = \frac{\Delta \gamma}{\gamma} \cdot R \cdot \sqrt{(1 - \sin \gamma)^2 + (1 - \cos \gamma)^2}. \quad (3.14)$$

Для угла закручивания манометрической трубки $\gamma = 270^\circ = 3\pi/2$ перемещение конца трубки будет равно:

$$W = 5,8 \cdot \frac{\Delta \gamma}{\gamma} \cdot R. \quad (3.15)$$

На рис. 3.7 б приведена схема деформационного манометра с трубчатой пружиной. Перемещение стрелки осуществляется с помощью зубчато-секторного передаточного механизма, соединенного со свободным концом чувствительного элемента. Зазоры в зубчато-секторной паре выбираются за счет спиральной пружины (на схеме не показана).

Манометры с одновитковой трубчатой пружиной делятся на технические общего и специального назначения; электроконтактные; с контрольной стрелкой (котловые); контрольные и образцовые (рабочие эталоны).

Технические манометры общего и специального назначения. Это показывающие приборы, класса точности 1; 1,5; 2; 2,5 и 4. Корпуса технических манометров окрашиваются, как правило, в черный или се-

рый цвет, за исключением манометров для измерения давления газов. Например, манометры, предназначенные для измерения давления кислорода окрашиваются в голубой цвет, аммиака в желтый, ацетилена в белый, водорода в темно зеленый и горючих газов в красный цвет. Диаметры корпусов манометров могут быть 40, 60, 100, 160 и 250 мм.

Пределы измерения манометров выбираются из ряда: $(0,6; 1; 1,6; 2,5; 4) \cdot 10^n$, где $n \leq 2$. Максимальный верхний предел измерения технических манометров составляет 250 МПа.

Типы: МПЗ – У...; МП4 – У...

Электроконтактные манометры (ЭКМ) предназначены для измерения давления и передачи информации его предельных значений в схемы защиты, сигнализации или управления. Отличаются от технических манометров наличием специальных электроконтактов и глубиной корпуса. Схема ЭКМ приведена на рис. 3.8.

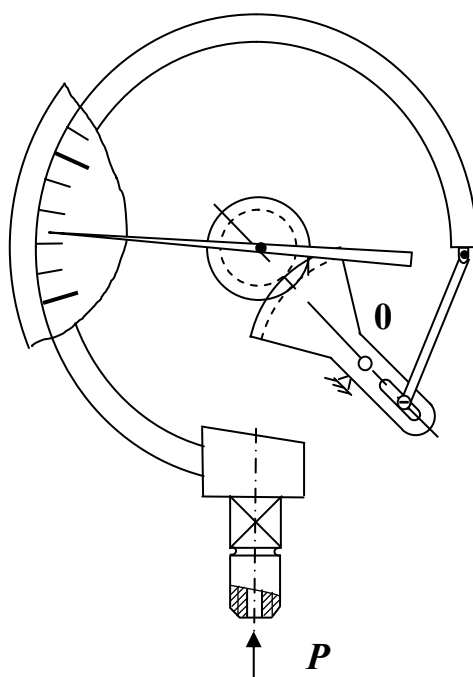


Рис. 3.8. Схема электроконтактного манометра
1, 3 – электроконтакты; 2 – стрелка с электроконтактами

Установка контактов 1, 3 может быть произведена на любые отметки рабочей части шкалы манометра вращением винта в головке, который находится на лицевой стороне ЭКМ. Типы: ЭКМ-160; ДМ2005Сг; ДМ2010Сг.

Манометры с контрольной стрелкой. Предназначены для измерения давления пара в барабане котла. Они снабжены дополнительной красной стрелкой, которая фиксирует максимальное давление и обратно не возвращается. Типа М-250 с диаметром корпуса 250 мм и классом точности 1,5.

Контрольные манометры являются переносными приборами и предназначены для периодических точных измерений давления, а также для поверки технических манометров на объекте. Верхний предел измерения $0,06 \div 160$ МПа. Тип МКО или МТИ с классом точности 0,6.

Образцовые манометры. Образцовые деформационные манометры применяются в качестве рабочих эталонов для поверки и калибровки технических манометров, а также для точных измерений давления в лабораторных условиях. Типа МО или ВО (вакуумметр образцовый) с верхним пределом измерения $0,1 \div 60$ МПа и классом точности 0,16; 0,25 и 0,4. Шкала градуируется в условных делениях, число которых может быть равно 100, 250 или 300.

3.5. МАНОМЕТРЫ ДИСТАНЦИОННЫЕ

Расстояния от места отбора давления до измерительного прибора не должно превышать 40 м. На ТЭС блочные щиты управления (БЩУ) могут находиться на расстоянии $100 \div 200$ м от объекта, в этом случае применяются дистанционные манометры, которые состоят из двух измерительных устройств: первичного измерительного преобразователя давления (датчика) и измерительного прибора. Структурная схема дистанционного манометра представлена на рис. 3.9.

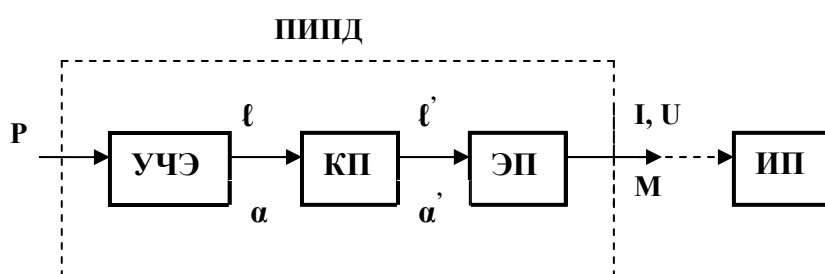


Рис. 3.9. Структурная схема дистанционного манометра
 КП – кинематическая передача, ЭП – электронный преобразователь,
 ПИПД – первичный измерительный преобразователь давления,

Электронные преобразователи бывают пяти видов: дифференциально-трансформаторный преобразователь (ДТП), с компенсацией магнитных потоков, с электросиловой компенсацией, тензопреобразователи и ферродинамические.

Преобразователи давления с ДТП типа МЭД и МИД. В качестве УЧЭ в них используется одноразовая трубчатая пружина. К запаянному концу пружины присоединяется плунжер (ферродинамический сердечник) ДТП с нормированной взаимной индуктивностью между первичной и вторичной обмотками $M = 10$ мГн при давлении равном верхнему пределу измерения. Схема первичного измерительного преобразователя давления приведена на рис. 3.10.

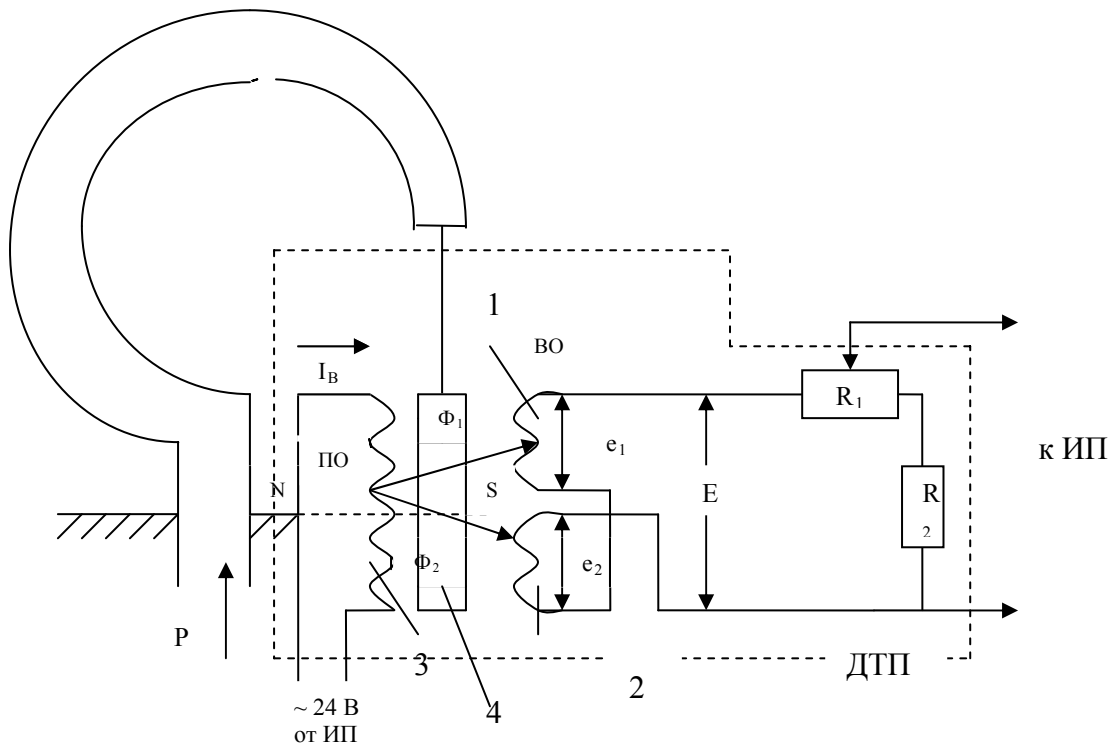


Рис. 3.10. Схема первичного измерительного преобразователя давления с ДТП: 1, 2, 3 – обмотки, 4 – плунжер, ПО – первичная обмотка, ВО – вторичная обмотка

Изменение положения плунжера вызывает изменение взаимной индуктивности между его обмотками, а, следовательно, и электрических параметров (напряжения и фазы) сигнала на выходе преобразователя, создаваемого током возбуждения I_B магнитного потока. Магнитный поток первичной обмотки (ПО) пронизывает обе секции вторичной обмотки (ВО). Часть этого потока Φ_1 пронизывает обмотку 1, индукция в ней напряжение e_1 ; часть потока Φ_2 пронизывает обмотку 2, индукция в ней напряжение e_2 . Значение e_1 и e_2 (по модулям) определяется через взаимные индуктивности M_1 и M_2 , между обмоткой возбуждения и секциями ВО. Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 однозначно связаны со значениями M_1 и M_2 в соответствии с уравнениями:

$$\begin{aligned} e_1 &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_B \cdot M_1 & \Phi_1 &= I_B \cdot M_1 \\ e_2 &= 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_B \cdot M_2 & \Phi_2 &= I_B \cdot M_2 \end{aligned} \quad (3.16)$$

Поскольку секции ВО включены встречно, т. е. в противофазе, то результирующее напряжение всей ВО, равно:

$$E = e_1 - e_2 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_B \cdot (M_1 - M_2) = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_B \cdot M, \quad (3.17)$$

где I_B – ток возбуждения,

f – частота I_B ,

M – взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и ВО.

Пример: плунжер симметричен относительно магнитной нейтрали NS (при этом $P = 0$):

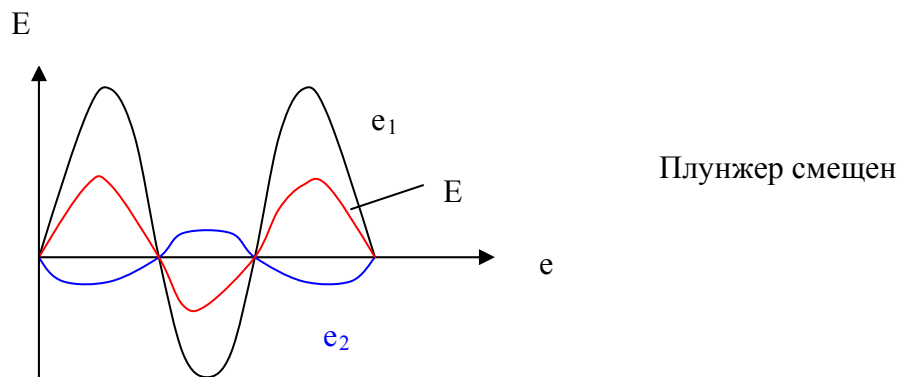
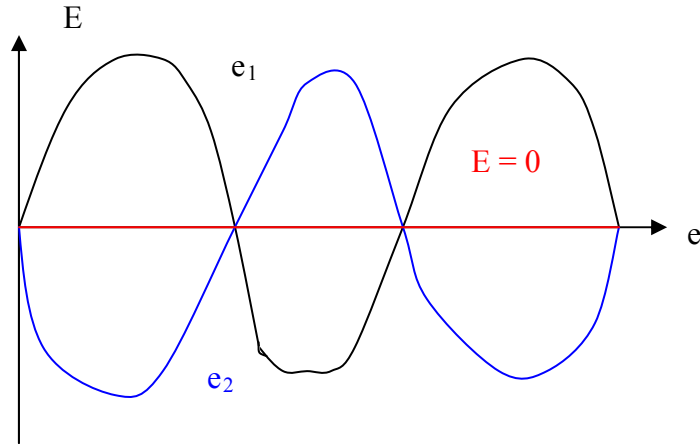


Рис. 3.11.

Для унификации выходных сигналов включен делитель напряжения R_1 и R_2 , смещением движка R_1 можно добиться одинаковой зависимости:

$$U_{\text{ВЫХ}} = f(x).$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot I_B \cdot M_H \cdot \left(\frac{x}{x_H} \right),$$

где $M_H = 10$ мГн – номинальная взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и выходной цепью;

$x_H = (1,6; 2,5; 4)$ мм – номинальное перемещение плунжера, соответствующее верхнему пределу измерения,

x – текущее значение положения плунжера.

Статические характеристики ДТП имеют вид

- $M_{\text{ВЫХ}} = f(x/x_H)$

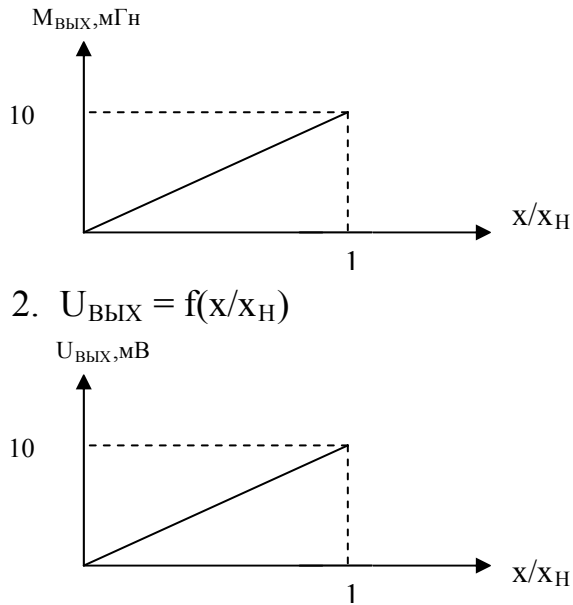


Рис. 3.12.

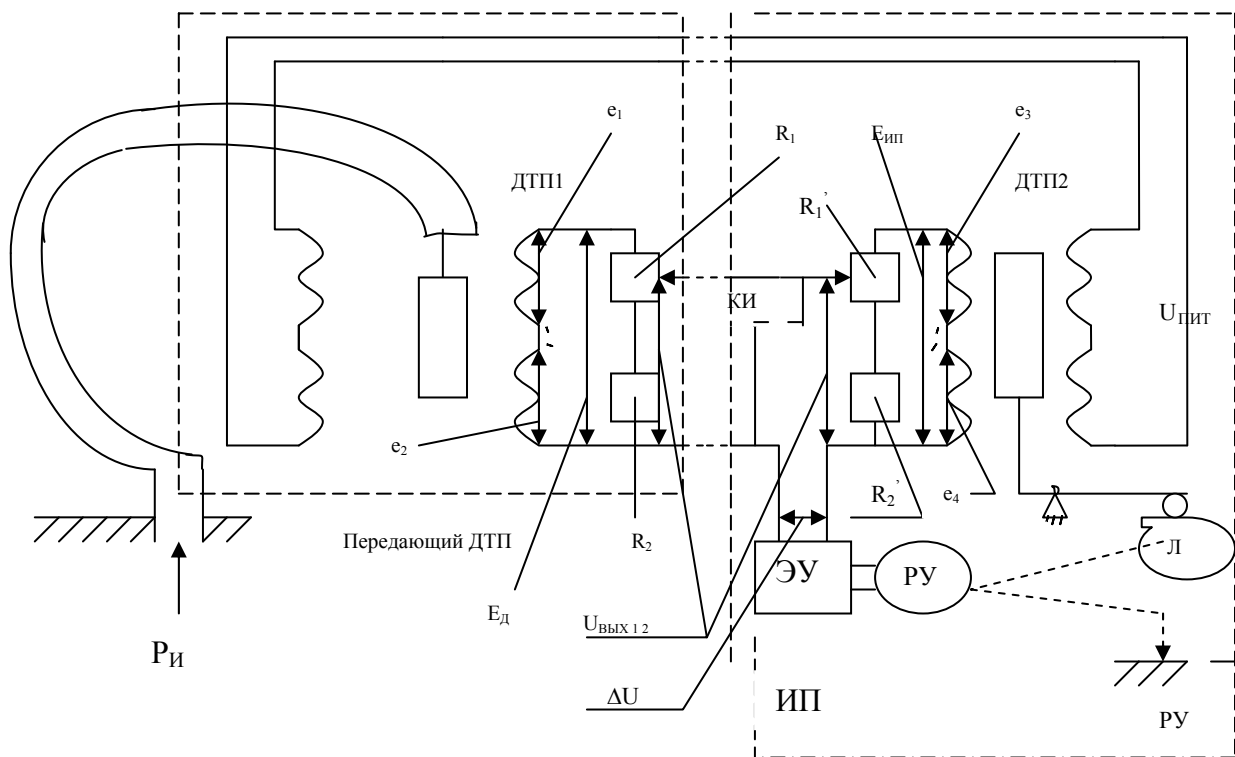


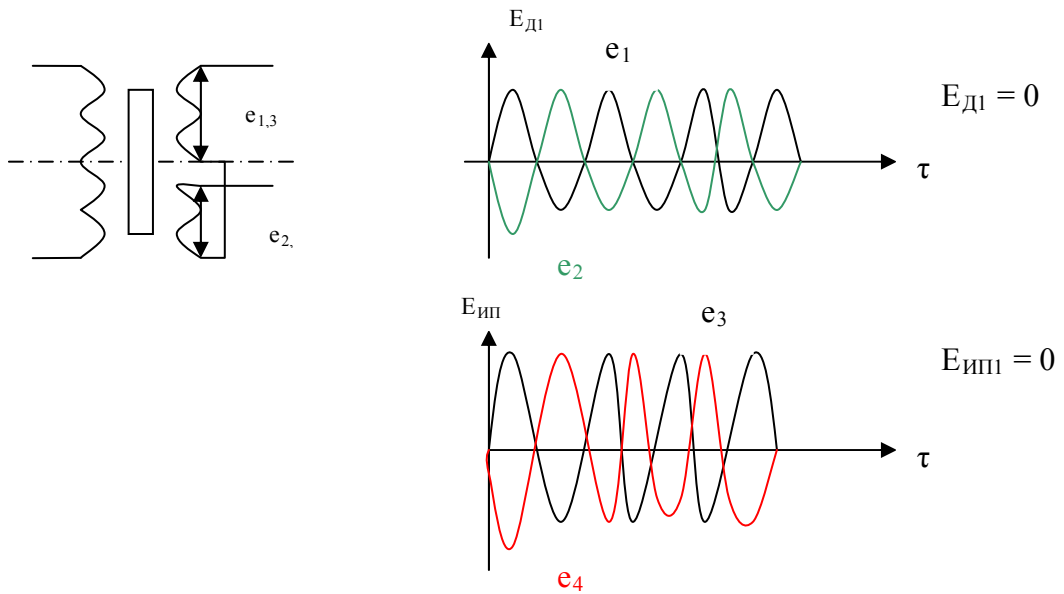
Рис. 3.13. Дистанционный манометр с дифтрансформаторной системой передачи

В ИП установлен точно такой же ДТП, который предназначен для компенсации входного сигнала, поступающего от первичного ДТП. В первичной обмотке ДТП соединены последовательно и питаются $\sim U = 24 \text{ В}$ от силового трансформатора ИП. Во вторичной обмотке подклю-

чен ДТП также последовательно и подсоединен к входным зажимам ЭУ.

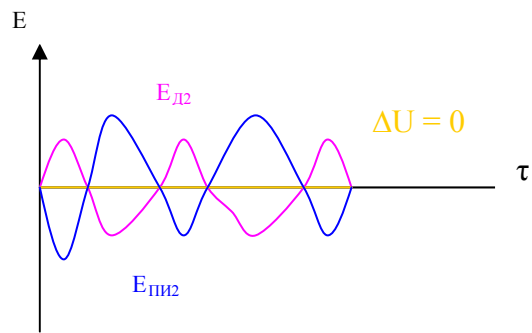
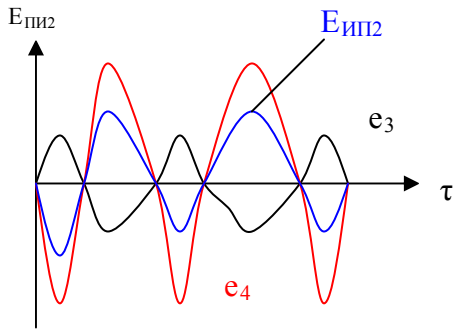
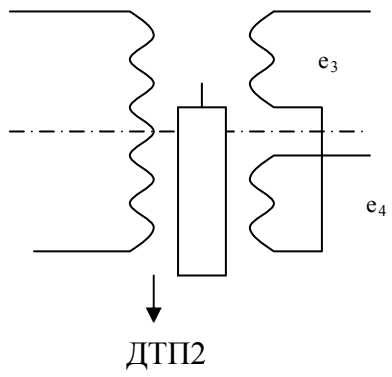
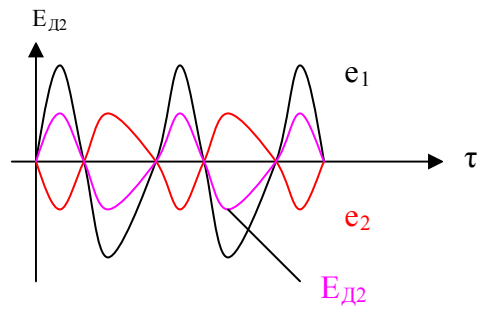
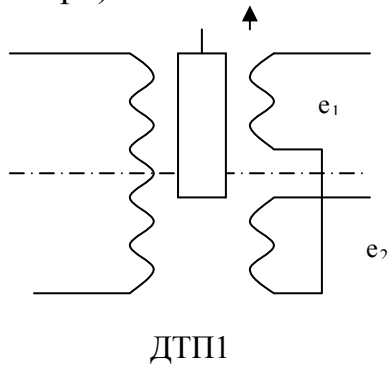
Работу данной системы целесообразно рассматривать в следующем порядке: $P_1 = 0$; $P_2 > 0$, схема скомпенсирована; $P_3 \uparrow$, схема не скомпенсирована.

При $P_1 = 0$ и среднем положении плунжера, т.е. когда плунжер симметричен относительно магнитной нейтрали в ДТП1 и ДТП2 ЭДС (напряжение) наводимые в каждой вторичной обмотке равны и взаимокompенсуются.

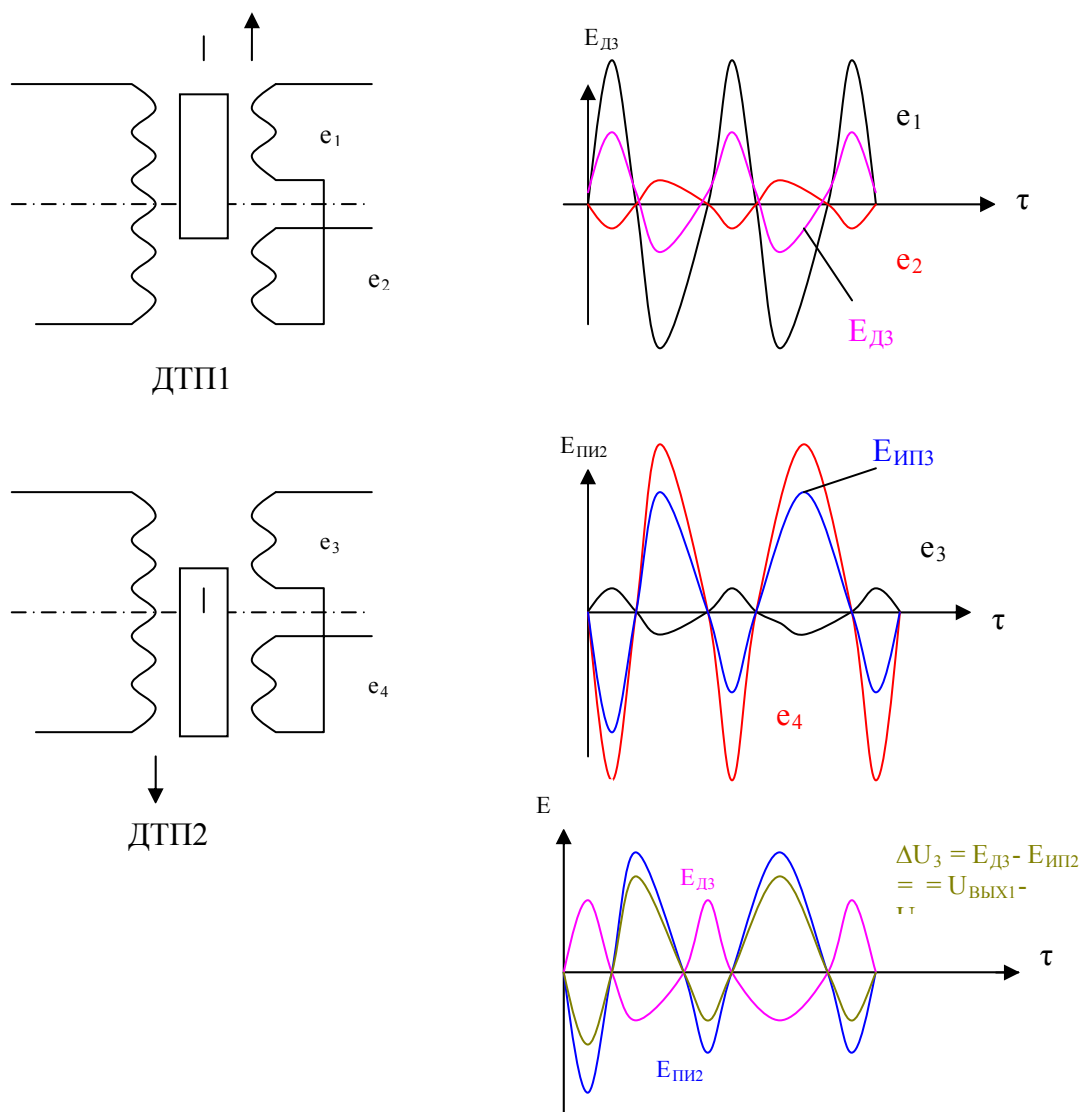


$P_2 > P_1$, схема скомпенсирована (P_2 если повышается, то плунжер ушел

вверх):



$$P_3 > P_2$$



Изменение давления, т.е. $P_3 > P_2$ вызывает дополнительное смещение плунжера в ДТП1 в следствии чего наводимые магнитным потоком напряжения в ее ВО E_1 и E_2 будут различные и равенство $E_{д2}$ и $E_{ип2}$ будет нарушено, при этом $E_{д3} > E_{ип2}$, тогда на вход ЭУ поступит результирующая разность напряжений между ВО ДТП, амплитуда и фаза которой зависит от величины и направления смещения плунжера в ДТП1, т.е. от P_3 .

$$\Delta U_3 = E_{д3} - E_{ип2} = U_{вых1} - U_{вых2}.$$

Следовательно, на вход ЭУ поступает ΔU , которая усиливается по мощности и напряжению, и подается на управляющую обмотку РД. Реверсивный двигатель, вращаясь одновременно воздействует на стрелку прибора и лекало (Л), с помощью которого перемещается плунжер ДТП2 до тех пор пока $E_{д3} = E_{ип3}$.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ С КОМПЕНСАЦИЕЙ МАГНИТНЫХ ПОТОКОВ

Предназначены для преобразования давления (или перепада давления) в унифицированный токовый сигнал $0 \div 5$; $4 \div 20$ мА.

В качестве передающего преобразователя для измерения давления применяются пружинные манометры с компенсацией магнитных потоков типа МПЭ – МИ, с пределами измерения: $0,1 \div 60$ МПа. Они предназначены для преобразования линейного перемещения ЧЭ в унифицированный сигнал постоянного тока $0 \div 5$; $4 \div 20$ мА. Преобразователи с компенсацией магнитных потоков (КМП), используются также для измерения разрежения, малых давлений и разрежений газовых сред, расхода методом переменного перепада давления и уровня.

Преобразователи с КМП.

Измеряемые параметры:

- I. давления до 40 кПа, разрежения. Типы: ДСЭН – МН, ДСЭН – МИ. УЧЭ является сильфон.
 - II. давления свыше 40 кПа. Типы: МПР – МН. УЧЭ – одновитковая трубчатая пружина.
 - III. расход (метод перепада давления). Типы: ДМЭР – МИ, ДСЭР – МИ. УЧЭ – двойная мембранная коробка (М), сильфон (С), расход (Р).
 - IV. уровень (гидростатические уровнемеры). ДМЭУ – МИ. УЧЭ – сдвоенная мембранная коробка.
 - V. перепад давления. ДМЭ – МИ. УЧЭ – сдвоенная мембранная коробка.
- $J = 0 \div 5$; $4 \div 20$ мА (см. скобку) → ИП: КСУ; диск 250; А 100; технограф; КП 1Т.

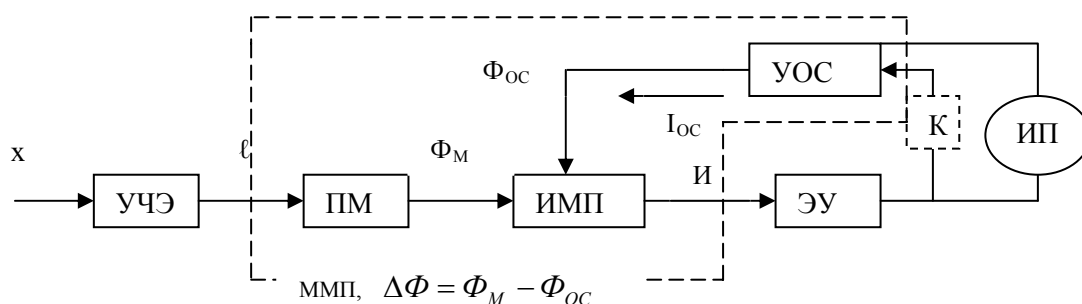


Рис. 3. Структурная схема преобразования с КМП:

ММП – магнитомодуляционный преобразователь; ПМ – постоянный магнит; ИМП – индикатор магнитных потоков; УОС – устройство обратной связи; ЭУ – электронный усилитель; К – квадратор – устройство, предназначенное для извлечения корня из входного параметра; ИП – измерительный прибор.

Принцип действия таких преобразователей заключается в том, что управляющий магнитный поток Φ_M , создаваемый в индикаторе магнитных потоков при перемещении постоянного магнита, компенсируется магнитным потоком обратной связи Φ_{OC} . При этом устанавливается определенная зависимость между выходным током и перемещением постоянного магнита, а значит и значением измеряемой величины. УЧЭ преобразует измеряемую величину x в линейное перемещение ℓ постоянного магнита. При перемещении магнита изменяется управляющий магнитный поток Φ_M , который в ИМП сравнивается с магнитным потоком обратной связи Φ_{OC} . На выходе индикатора появляется напряжение U , пропорциональное разности магнитных потоков $\Delta\Phi = \Phi_M - \Phi_{OC}$, которое ЭУ преобразуется в выходной токовый сигнал $I_{ВЫХ}$. Ток $I_{ВЫХ}$ поступает в линию дистанционной передачи и одновременно в УОС, выходной ток которого I_{OC} создает магнитный поток Φ_{OC} , который в свою очередь компенсируется магнитным потоком Φ_M . УОС позволяет установить необходимый закон преобразования $I_{ВЫХ} = f(x)$. Эта зависимость может быть либо линейной в приборах для измерения давления, уровня, перепада давления; либо квадратичной в расходомерах переменного перепада давления.

Магнитная система преобразователя состоит из двух магнитопроводов, двух ИМП и расположенного между ними постоянного магнита.

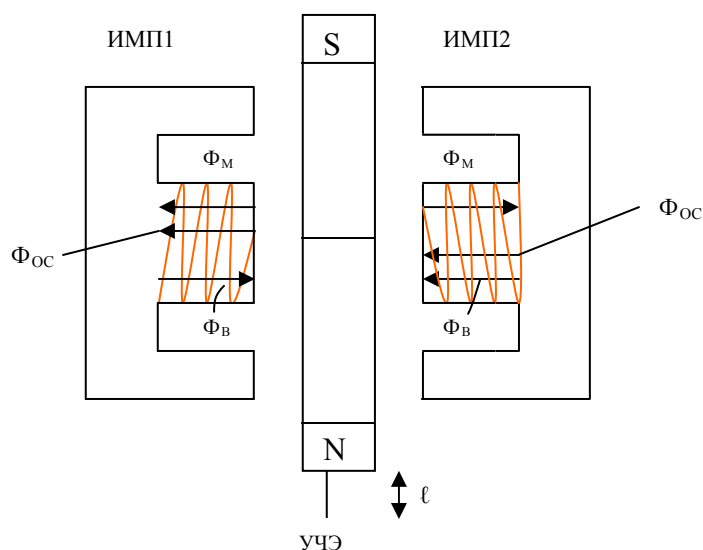


Рис.3. Конструкция преобразователя с КМП

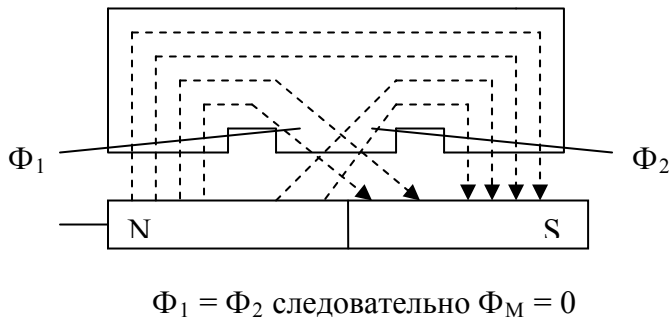
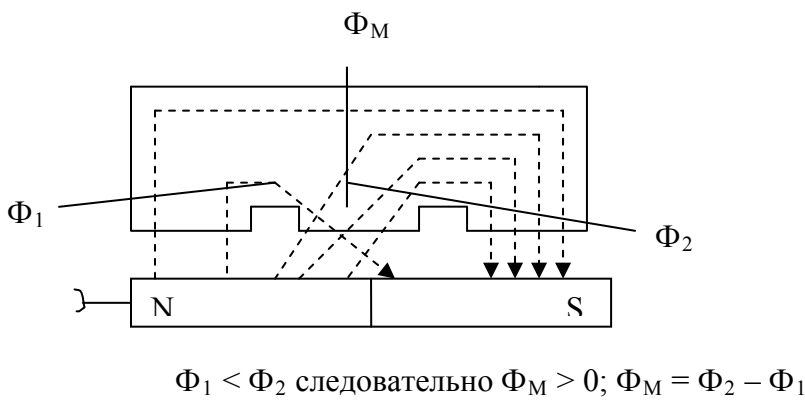
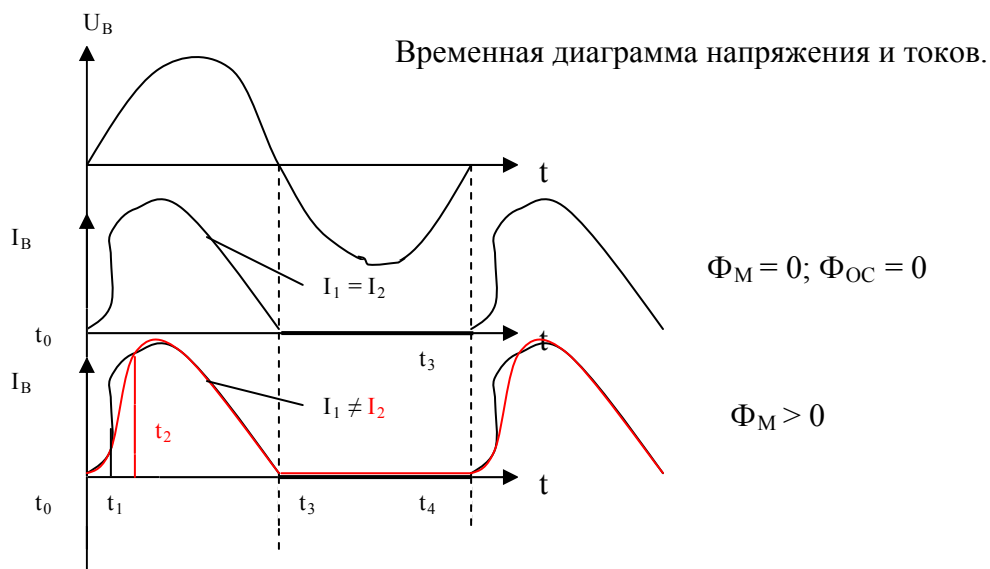


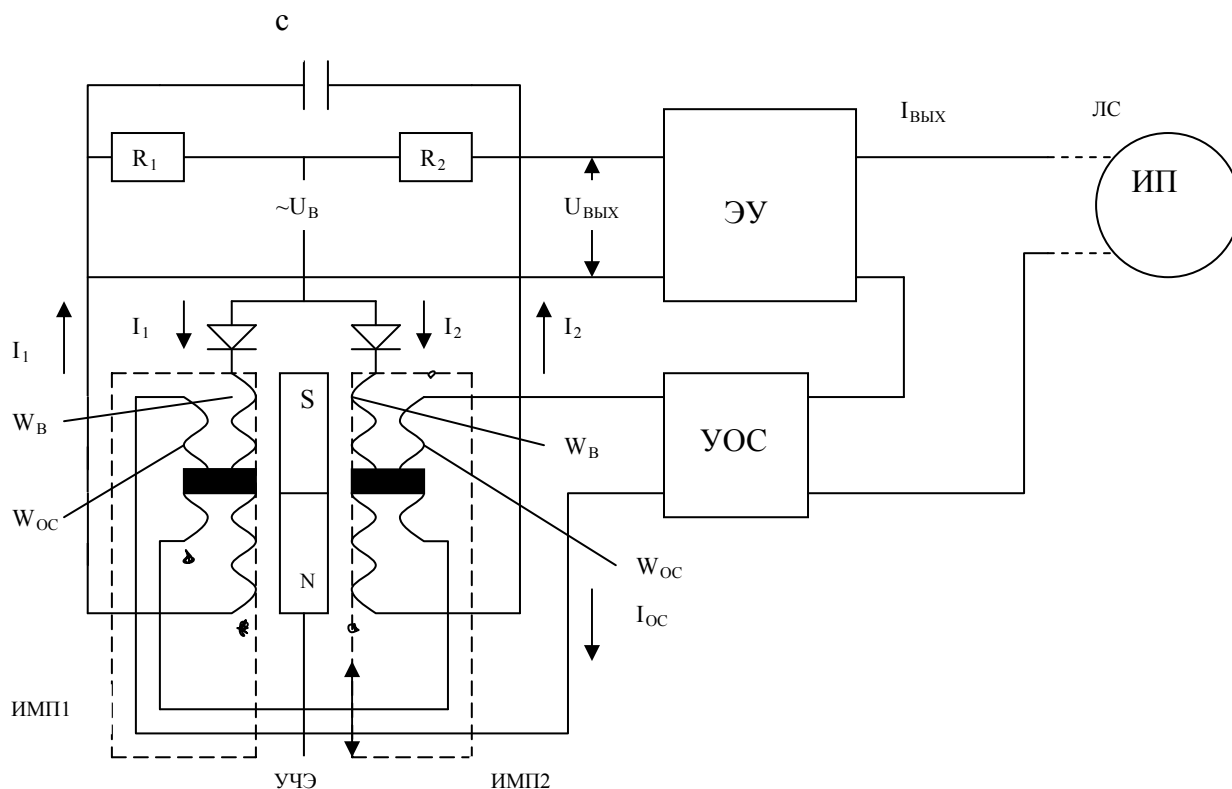
Схема формирования управляющего магнитного потока Φ_M



Электрическая схема преобразования содержит по две обмотки возбуждения и обратной связи (ОС), расположенные на двух разных индикаторах магнитных потоков. Магнитные потоки постоянного магнита Φ_M и обмотки ОС Φ_{OC} в каждом индикаторе направлены навстречу друг другу, а магнитный поток обмотки возбуждения Φ_B в ИМП1 складывается с Φ_M , а в ИПМ2 – вычитается. Преобразования магнитного потока Φ_M в постоянный выходной ток $I_{ВЫХ}$ рассмотрим, используя электрическую схему преобразователя.



Принципиальная электрическая схема преобразователя с КМП.



Обмотки возбуждения W_B индикаторов 1 и 2 и R_1, R_2 образуют измерительный мост. В диагональ питания этого моста подводится напряжение питания U_B , а с измерительной диагонали снимается выходное напряжение $U_{ВЫХ}$. Работа преобразователя основана на использовании явления магнитного насыщения материала магнитопровода ИМП.

Предположим, что потоки Φ_{OC} и Φ_M равны нулю, при этом магнит находится в среднем положении и в магнитопроводе ИМП присутствует только магнитный поток Φ_B , создаваемый токами возбуждения I_1 и I_2 . Из-за наличия диодов, токи I_1 и I_2 проходят через обмотку возбуждения только в положительный полупериод напряжения U_B . В промежутке $t_0 \div t_1$ с возрастанием U_B , возрастают токи возбуждения I_1 и I_2 . При этом увеличиваются магнитные потоки возбуждения Φ_B . В момент t_1 магнитные потоки возбуждения Φ_B насыщают магнитопроводы индикаторов. При этом индуктивность и полное сопротивление обмоток резко уменьшаются и значения токов резко увеличивается. В интервале $t_1 \div t_2$ токи изменяются по синусоиде, в интервале $t_2 \div t_3$ токи равны нулю из-за запираания диодов. В момент t_3 процесс изменения токов повторяется. Т.о. в любой момент времени $I_1 = I_2$, поэтому сигнал $U_{ВЫХ}$, снимаемый с R_1 и R_2 , в любой момент времени также равен нулю, т.е.

$$U_{ВЫХ} = I_1 \cdot R_1 - I_2 \cdot R_2 = 0, \text{ так как } R_1 = R_2.$$

При смещении постоянного магнита в обоих магнитопроводах появляется управляющий магнитный поток Φ_M . Как мы предположили, в

индикаторе 1 Φ_M складывается с потоком Φ_B , а в индикаторе 2 вычитается. Это приводит к тому, что в магнитопроводе ИМП1 состояние насыщения наступает раньше (момент t_1), чем в ИМП2 (момент t_2). Вследствие этого резкое увеличение тока I_1 происходит раньше, чем I_2 , откуда следует, что в интервале $(t_1 - t_2)$ $I_1 > I_2$ и падение напряжения на R_1 будет больше, чем на R_2 . Следовательно, $U_{ВЫХ} \neq 0$. Данное напряжение поступает на вход усилителя, который преобразует его в выходной ток $I_{ВЫХ}$. Пропорциональный выходному току $I_{ВЫХ}$ ток обратной связи $I_{ОС}$ вызывает появление потока ОС $\Phi_{ОС}$, компенсирующего поток Φ_M . При этом восстанавливается приближенное равенство токов $I_1 \approx I_2$, для любых моментов времени.

Из сказанного не трудно заметить, что, повышая Φ_M (при повышении значения измеряемой величины), требуется повысить $\Phi_{ОС}$. Это обеспечивается увеличением выходного тока и тока обратной связи. Таким образом, устанавливается однозначная зависимость между значениями измеряемой величины (давление) и выходным током $I_{ВЫХ}$. Статическая характеристика преобразователя, т.е. $I_{ВЫХ} = f(\ell)$, определяется видом зависимости $I_{ОС} = f(I_{ВЫХ})$.

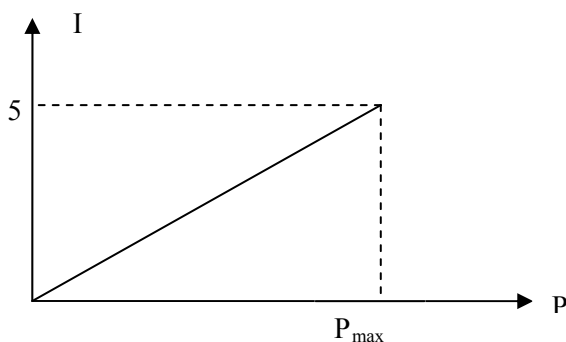
Если $I_{ОС} = K_1 \cdot I_{ВЫХ}$, то $I_{ВЫХ} = K_2 \cdot \ell$,

если $I_{ОС} = K_3 \cdot I_{ВЫХ}$, то $I_{ВЫХ} = K_4 \cdot \sqrt{\ell}$,

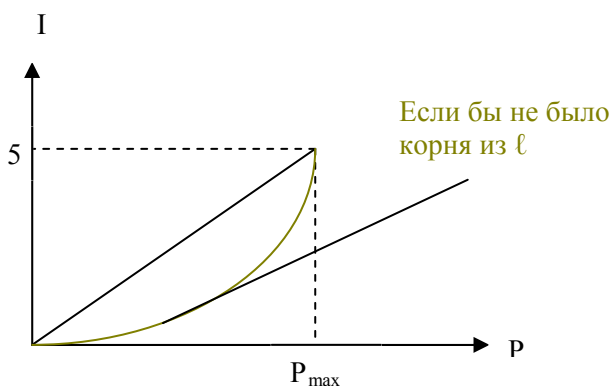
где $K_1 \div K_4$ – постоянные коэффициенты;

ℓ – смещение магнита относительно магнитной нейтрали.

Выходной сигнал с выхода преобразователя поступает по линиям связи на ИП. Класс точности $K = 1$.



Для (*).
 Типы: МПЭМИ, ДМЭ – МИ,
 ДМЭУ – МИ, ДСЭН – МИ,
 ДСЭТ – МИ.



Для (**).
 Типы: ДМЭР – МИ,
 ДСЭР – МИ.

Рис. 3. Статическая характеристика преобразователя 5 мА
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ САПФИР – 22 – ДИ

Сапфир – 22 – ДИ предназначен для преобразования избыточного давления в унифицированный токовый сигнал (0÷5, 0÷20, 4÷20 мА). Верхний предел измерения давления 0,25÷250 кПа и 0,4÷1000 МПа. Класс точности: К = 0,25; 0,5.

Сапфиры состоят из двух частей: измерительного блока и электронного устройства.

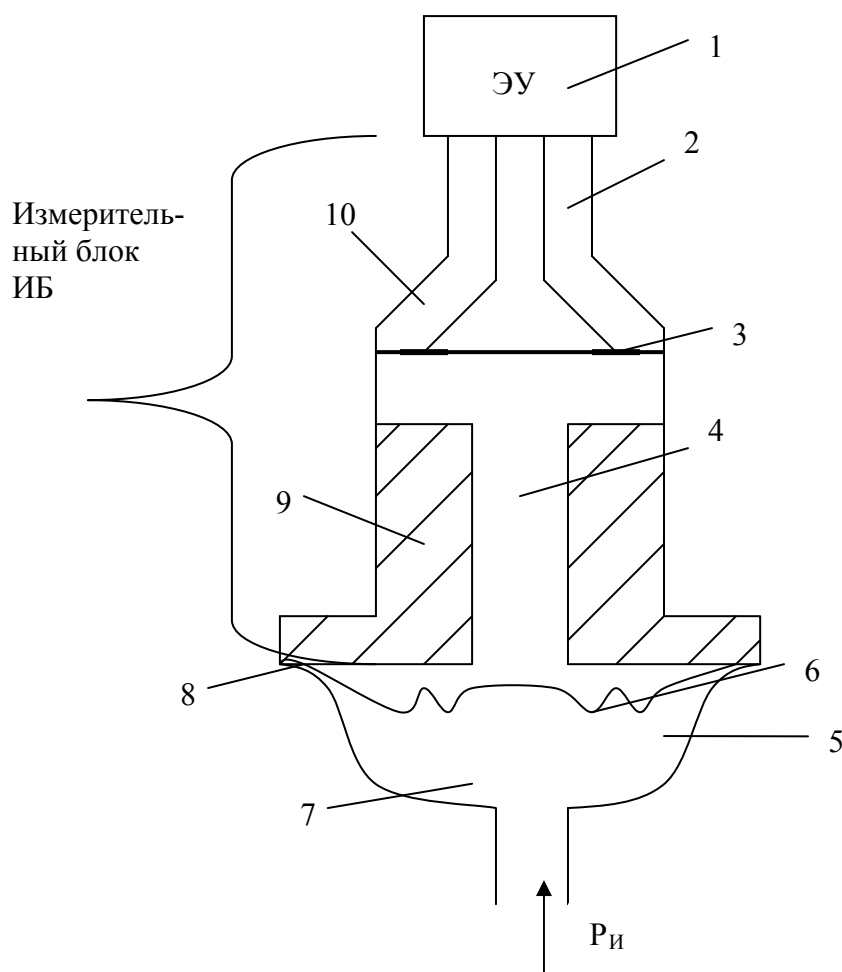


Рис. 3. Схема измерительного блока преобразователя Сапфир-22-ДИ модель 2150, 2160, 217.

Тензопреобразователь 3 размещен внутри корпуса 9. Внутренняя полость 4 тензопреобразователя заполнена кремнийорганической жидкостью и отделена от измеряемой среды гофрированной упругой мембраной 6. Измеряемое давление подается в камеру 7, образованную фланцем 5. Между корпусом 9 и фланцем 5 помещена прокладка 8. Полость 10 сообщается с окружающей атмосферой. Измеряемое давление воздействует на мембрану 6 и через жидкость передается на мембрану тензопреобразователя 3, вызывая прогиб и соответствующее изменение

сопротивления закрепленных на ней тензорезисторов, соединенных в массивную схему.

Электрический сигнал по проводам через герметичный вход 2 поступает в электронное устройство 1, в котором установлены коллекторы для плавной подстройки диапазона измерения и нуля.

Сапфиры относятся к классу резистивных деформационных манометров, работа которых основана на изменении активного электрического сопротивления проводников или полупроводников при их механической деформации, т.е. при их прогибе (изгибе).

Такой метод измерения давления называется тензометрическим. Принципиальное его отличие в том, что мерой давления является не перемещение заданной точки УЧЭ, а деформации поверхности УЧЭ, а, следовательно, и поверхности, связанного с ним тензорезистора.

Тензорезистором называется измерительный преобразователь, который преобразует деформацию поверхности твердого тела в изменение его электрического сопротивления.

Основная характеристика «тензоэффекта» - это коэффициент относительной тензочувствительности. Он определяется как отношение изменения сопротивления проводника к изменению его длины

$$K = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\frac{\Delta \ell}{\ell}},$$

где $\Delta R/R$ – относительное изменение сопротивления;
 $\Delta \ell/\ell$ – относительное изменение длины.

Для твердых тел $\Delta R/R$ зависит от изменения геометрических размеров и от изменения удельного сопротивления, т.е.

$$K = 1 + 2 \cdot \mu + m,$$

где μ – коэффициент Пуассона (для металлов).

$$m = \frac{\frac{\Delta \rho}{\rho}}{\frac{\Delta \ell}{\ell}} - \text{изменение удельного сопротивления материала, связанное с изменением его физических свойств.}$$

Для металлов $(1 + 2 \cdot \mu) \gg m$;

Для полупроводниковых материалов $(1 + 2 \cdot \mu) \ll m$.

Поэтому для полупроводниковых тензорезисторов $K = m$, для металлических тензорезисторов $K = 1 + 2 \cdot \mu$. Для металлических тензорезисторов $K \approx 2$, для кремниевых тензорезисторов: $K \approx 125 \div 135$.

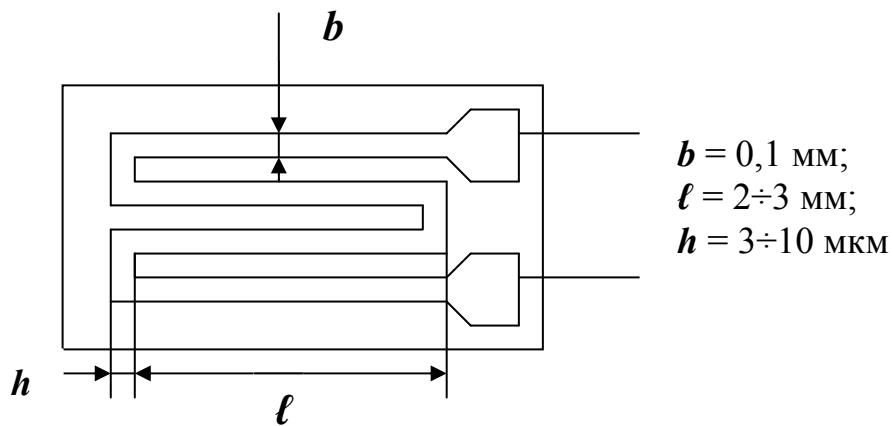


Рис. 3. Конструкция фольгового тензорезистора

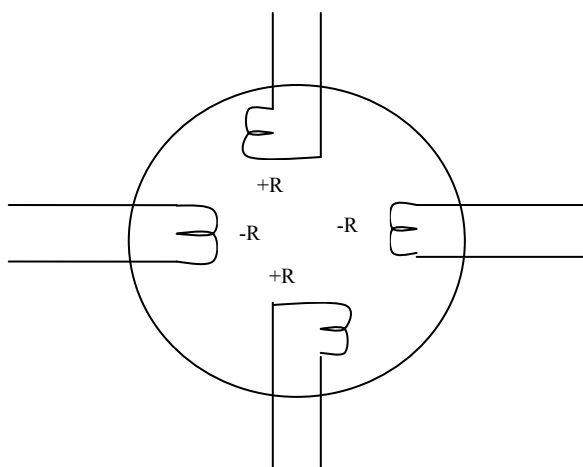


Рис. 3. Схема расположения тензорезисторов на поверхности УЧЭ

В зависимости от расположения тензорезисторов можно менять чувствительность измерительной схемы.

Статическая характеристика (расчетное значение выходного сигнала) $I_{\text{РАСЧЕТ}}$ для любого заданного значения входного сигнала (параметра, например давления) преобразуемый с диапазоном измерения в выходной сигнал $0 \div 5$, $0 \div 20$ мА определяется по формуле

$$I_{\text{РАСЧЕТ}} = \frac{P}{P_{\text{max}}} \cdot I_{\text{max}}$$

Для тока $4 \div 20$ мА:

$$I_{\text{РАСЧЕТ}} = \frac{P}{P_{\text{max}}} \cdot (I_{\text{max}} - I_{\text{min}}) + I_{\text{min}}$$

где P , P_{max} – заданное и максимальное значение давления;

I_{max} – верхний предел номинального значения выходного сигнала,

I_{min} – нижний предел номинального значения выходного сигнала.

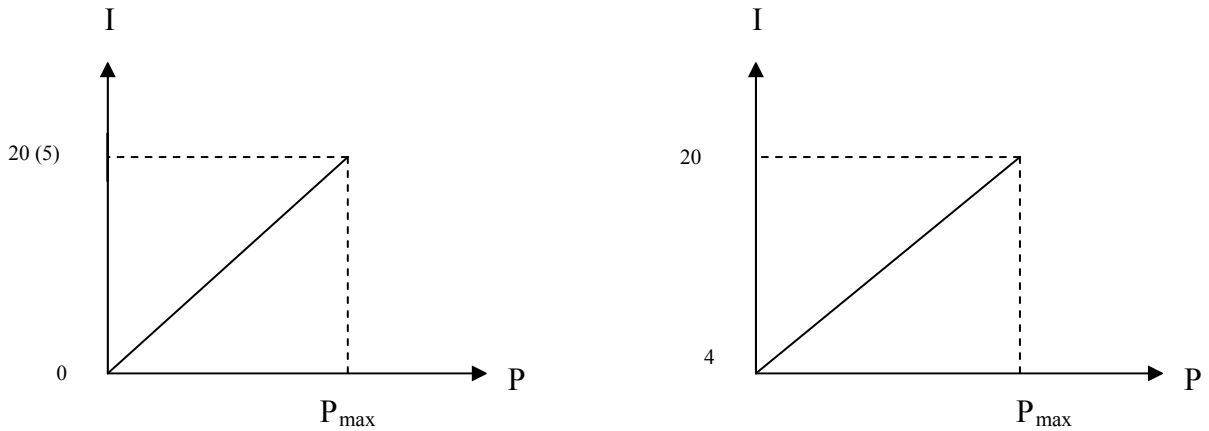


Рис. 3. Статическая характеристика

Блоки питания для Сапфиров: БПС – 24П; БПС – 24К; БПД – 40 – 2К; БПД – 40 – 4К; БПК – 40 – 2К; БПК – 40 – 4К; БИК.

24 – выдаваемое напряжение; К в 5 – 7 это означает, что внутри есть статическое устройство для извлечения корня.

Аналогично сделаны Метраны (большое будущее у них).

Грузопоршневые манометры (ГПМ)

В них измеряемое давление уравнивается силой тяжести *не-нулевого* поршня с грузами. ГПМ используются в качестве рабочих эталонов для воспроизведения единицы давления в диапазоне от 10^{-1} до 10^3 Па и предназначены для поверки и калибровки манометров более низкого класса точности.

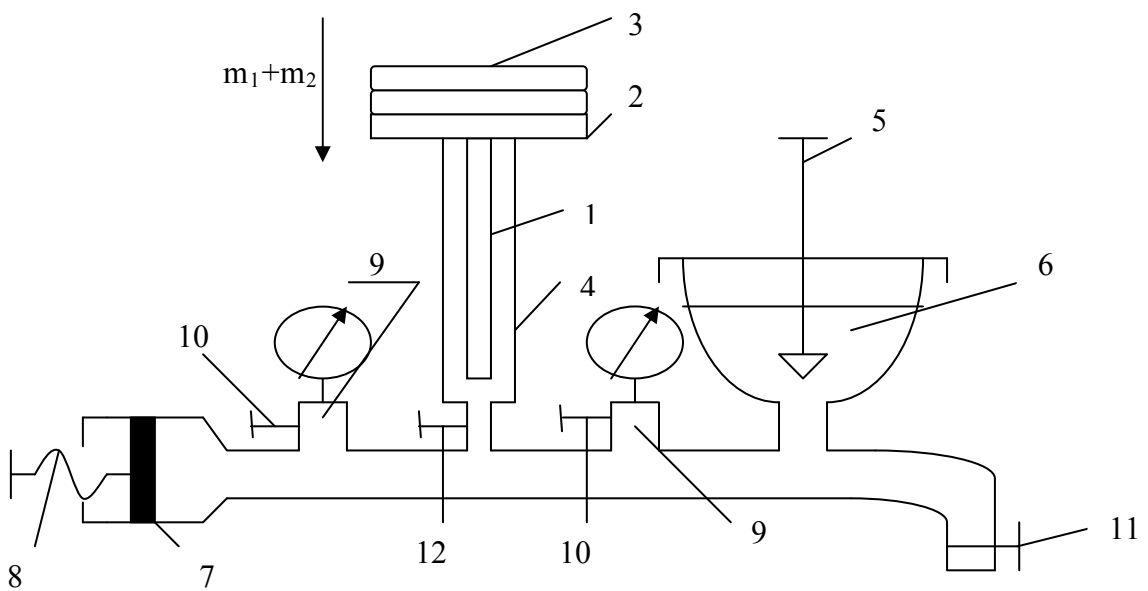


Рис. 3. Схема ГПМ типа МП-60 с пределом измерения от 1 до 60 кгс/см²

Поршень 1 с тарелкой 2 для грузов 3 перемещается внутри цилиндра 4. поршневая пара (колонка) погоняется таким образом, чтобы зазор между поршнем и цилиндром не превышал 0,01 мм. Для обеспечения равномерности зазора между 1 и 4, поршень 1 в момент измерения обязательно вращают по часовой стрелке. Внутренняя полость ГПМ заполняется рабочей жидкостью (керосином, трансформаторным или касторовым маслом). При открытом вентиле 5 в воронку 6 заливается рабочая жидкость, поршнем 7 винтового пресса 8 она засасывается внутрь манометра. К штуцерам 9 с запорными вентилями 10 подсоединяются поверяемые ГПМ. Вентиль 11 служит для слива жидкости из ГПМ. Для получения заданного давления на 2 с учетом ее массы и массы поршня 1 накладывают грузы 3, создающие определенную силу тяжести. Грузы 3 калиброваны, т.е. на них написано значение создаваемого ими давления. В состоянии равновесия давление внутри ГПМ равно:

$$P = \frac{q_H \cdot (m_1 + m_2)}{F_{\text{эф}}},$$

где m_1, m_2 – масса поршня с тарелкой и грузов соответственно;

q_H – нормальное ускорение свободного падения;

$F_{\text{эф}}$ – эффективная площадь поршня.

Учитывая, что калибровка грузов производится для q_H , при измерениях необходимо вводить поправку на местное ускорение свободного падения или перекалибровать грузы. Эффективная площадь поршня $F_{\text{эф}}$ равна сумме площади торца поршня и половине площади зазора. Для ГПМ типа МП – 60 $F_{\text{эф}} = 0,5$ или 1 см^2 , что обеспечивает отсутствие прогиба поршня под тяжестью грузов.

ГПМ может использоваться и как пресс при этом вентилем 12 отключается колонка, на один штуцер устанавливается образцовый манометр, а другом поверяемый.

Класс точности ГПМ

I.Разряд: $K = 0,01$;

II.Разряд: $K = 0,02$;

III.Разряд: $K = 0,05$.

Типы ГПМ: МП – 0,4 – воздух; МП – 2,5 – керосин; МП – 6 и МП – 60 – трансформаторное масло; МП – 600 и МП – 2500 – касторовое масло (2500 – верхний предел измерения).

Как произвести поверку: $0,25 \text{ кгс/см}^2$.

Напоромеры, тягомеры и тягонапоромеры

Предназначены для измерения небольших избыточных давлений (до 40 кПа) и вакуумметрических давлений неагрессивных газовых сред. Например, в котлах напоромерами измеряют давление воздуха, тягомерами – разрежения в газоходах, а тягонапоромерами – разрежения или давления в топках котла. В качестве УЧЭ применяется мембранная коробка.

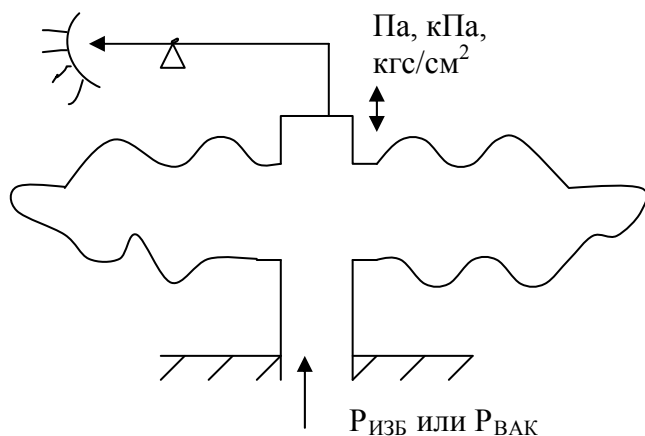


Рис.3.

Измеряемое давление через штуцер, расположенный на задней стенке прибора подается внутрь мембранной коробки, при этом центр ее перемещается, что приводит в движение систему тяг и рычагов, которые передвигают стрелку вдоль шкалы.

Типы напоромеров – НМП, НП – 100; тягомеров – ТМП, тягонапоромеров – ТНМП. Классы точности $K = 1,5; 2,5$.

Они могут работать при температуре окружающего воздуха и среды в мембранной коробке от 5°C до 50°C и относительной влажности 80%. Изменение показаний мембранных приборов, вызванное изменением температуры окружающей среды от нормальной (20°C) до любой температуры от 5°C до 50°C, на каждые 10°C не должно превышать:

$$\Delta = \pm \left[x + 0,025 \cdot (|t - t_H|) \right],$$

где x – значение допускаемого *постоянства* показаний,

которое принимается $x = 0,5\Delta_{\text{доп}}$;

t – любое значение температуры в интервале 5÷50°C;

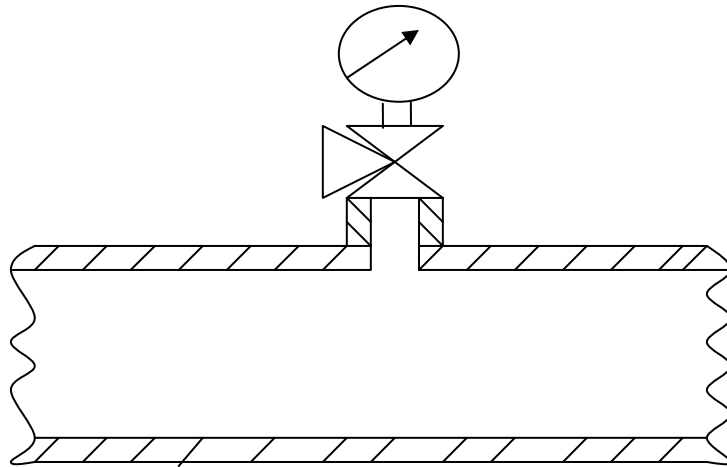
t_H – нормальная температура (+20°C).

Методика измерения давления

При выборе места отбора давления необходимо чтобы:
– в месте отбора давления отсутствовали возмущения течения измеряемой среды,

- устройства отбора давления не вызывало бы само по себе возмущение течения потока,
- края отборного отверстия со стороны протекающей среды не выступали бы в нее, так как они могут вызвать трудно учитываемую погрешность за счет динамического давления.

При измерении давлений за счет влияния динамического давления движущейся среды, часто возникают дополнительные погрешности.



Самая простая схема установки манометра

Рис. 3.

$$P_d = \frac{v^2}{2} \cdot \rho, \quad \text{МПа}$$

где v – скорость потока, м/с;

ρ – плотность сред, кг/м³.

Например, при движении воздуха со скоростью 25 м/с и давлении близком к атмосферному, при этом $\rho = 1 \text{ кг/м}^3$, то

$$P_d = \frac{25^2}{2} \cdot 1 = 312,5 \text{ МПа.}$$

Если само измеряемое давление невелико 300 МПа, то погрешность будет составлять более 100%. Это следствие просунутой в трубу трубки.

Измерение расхода

Основные понятия

Расходом вещества называется количество вещества, проходящего через данное сечение канала в единицу времени, а измерительный прибор служащий для измерения расхода – расходомер (ГОСТ 15528).

Массовый расход измеряется в кг/с, объемный – м³/с, приборы градуируются часто в т/ч, м³/ч.

В зависимости от метода измерения выпускаются следующие расходомеры:

1) переменного перепада давления, основанные на зависимости расхода от перепада давления на СУ вследствие частичного перехода потенциальной энергии потока в кинетическую;

2) скоростного напора для измерения расхода по динамическому напору потока с помощью пневмометрических трубок Пито-Прандтля;

3) переменного уровня, основанные на зависимости свободном истечении ее через отверстие в дне или боковой стенке (расходомеры обтекания, ротометры);

4) постоянного перепада давлений, основанные на зависимости расхода вещества от вертикального перемещения тела (поплавка), изменяющего площадь проходного сечения прибора таким образом, что перепад давлений по обе стороны поплавка остается постоянным.

5) тахометрические (турбинные, шариковые и т.п.), преобразующие скорость потока в угловую скорость вращения обтекаемого элемента (турбинки, шарика);

6) электромагнитные, преобразующие скорость движущейся в магнитном поле электропроводящей жидкости в ЭДС.

7) ультразвуковые расходомеры, основанные на эффекте переноса звуковых колебаний движущейся средой.

Существует понятие количества вещества. Количество вещества можно измерить в единицах массы [кг, т], либо в единицах объема [м³, л]. Приборы применяемые для измерения количества вещества называются счетчиками вещества (счетчики). В каждом конкретном случае следует добавлять наименование контролируемой физической величины. Например: «водосчетчик» или «расходомер перегретого пара».

Расходомеры переменного перепада давления (РППД)

Наиболее распространенным методом измерения расхода жидкости, пара и газа является метод переменного перепада давления.

Принцип действия РППД основан на измерении перепада давления ($\Delta P = P_1 - P_2$) на СУ, который является функцией расхода измеряемой среды.

В качестве стандартных СУ (первичных преобразователей) используются диафрагмы, сопла ИСА 1932, трубы Вентури.

В состав РППД входят следующие основные элементы:

- 1) Первичный измерительный преобразователь – СУ.
- 2) Соединительное устройство – импульсные линии, передающие ΔP от СУ к дифманометру – расходомеру.
- 3) Измерительный прибор (преобразователь), предназначенный для измерения расхода (преобразования ΔP в другую форму сигнала, удобную для дальнейшей передачи на ИП).

РППД пригодны для измерения расхода при соблюдении следующих условий измерения:

- 1) Характер движения среды в прямых участках трубопровода до и после СУ должен быть установившимся.
- 2) Среда должна быть однофазной и фазовое состояние потока не должно изменяться при его течении через СУ.
- 3) Во внутренней полости прямых участков трубопроводов до и после СУ не должны скапливаться осадки в виде пыли, песка, металлических предметов и других видов загрязнений.
- 4) На поверхностях СУ не должны образовываться отложения, изменяющие его конструктивные размеры и геометрию.

Уравнение расхода

Теория и основные уравнения измерения расхода по методу переменного перепада давления одинаковы для стандартных СУ всех видов. Различаются лишь некоторые коэффициенты в уравнениях, определяемые опытным путем.

Выведем уравнение расхода для случая, когда в трубопроводе установлена диафрагма и по трубопроводу протекает несжимаемая жидкость, плотность которой до и после сужения остается неизменной.

Выделим в трубопроводе два сечения: I – сечение в котором еще нет влияния СУ на характер потока; II – сечение в системе наибольшего сжатия струи на некотором расстоянии от диафрагмы.

Обозначим: S_1, S_0, S_2 – площади поперечного сечения соответственно трубопровода, отверстия диафрагмы и наиболее суженного места струи, m^2 ;
 P_1, P_0, P_2 – абсолютные давления жидкости в соответствующих сечениях потока, Па;
 V_1, V_0, V_2 – средние скорости в указанных сечениях потока, м/с.

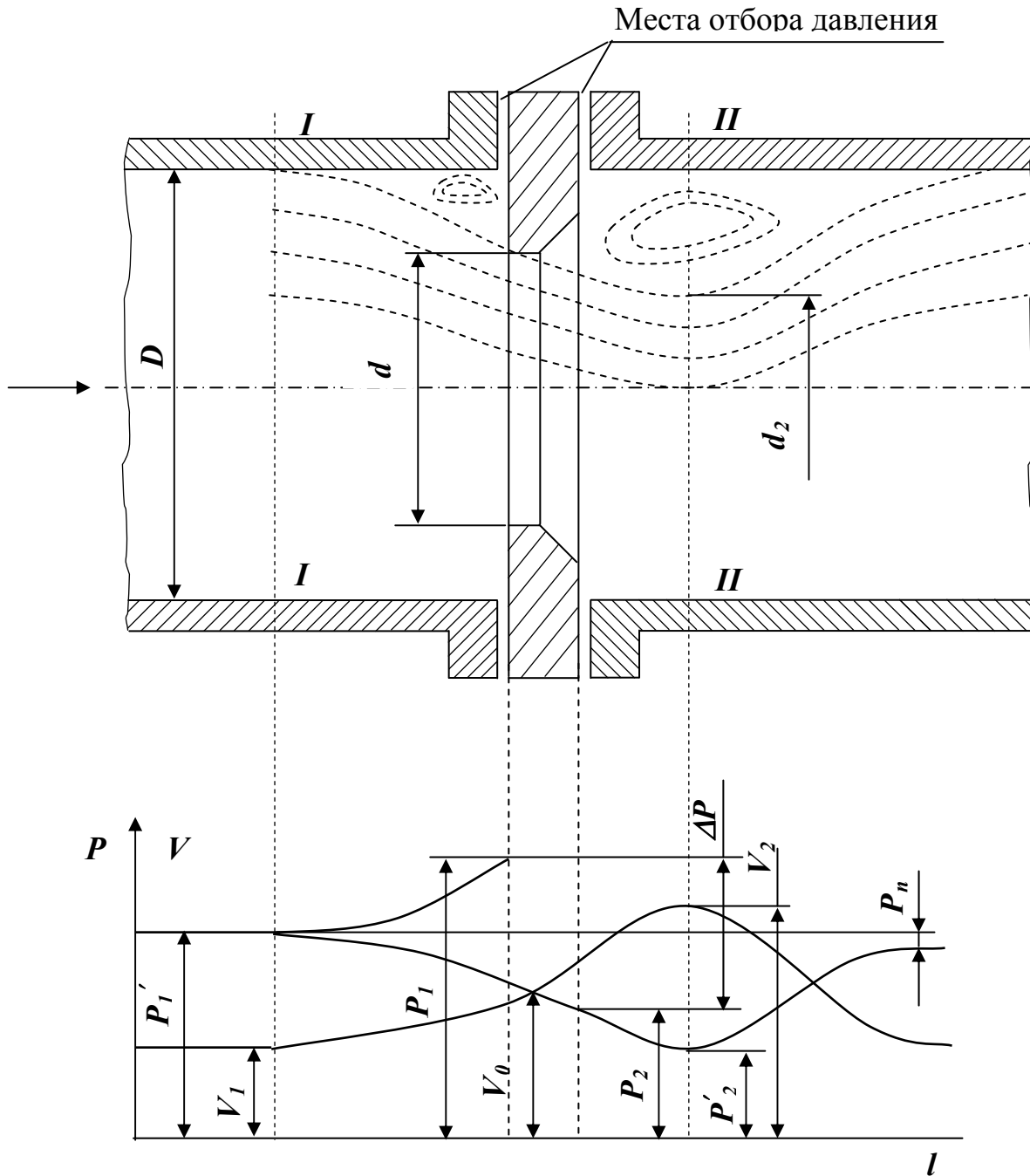
Из условия неразрывности струи следует:

$$S_1 V_1 = S_0 V_0 = S_2 V_2 \text{ или } S_0/S_1 = V_1/V_0 \text{ и } S_2/S_0 = V_0/V_2.$$

Отношение $S_0/S_1 = m$ называется относительной площадью СУ, а отношение $S_2/S_0 = \mu$ – коэффициентом сужения струи. Тогда и $V_1/V_0 = m$ и $V_0/V_2 = \mu$. Из этих отношений находим:

$$V_1 = m V_0 \text{ и } V_0 = \mu V_2, \text{ тогда } V_1 = m \mu V_2$$

(1)



Для несжимаемой жидкости при постоянной плотности с учетом потерь и неравномерности распределения скоростей для сечения I и II горизонтального трубопровода напишем уравнение Бернулли:

$$\frac{P'_1}{\rho} + \frac{k_1 V_1^2}{2} = \frac{P'_2}{\rho} + \frac{k_2 V_2^2}{2} + \frac{\xi V_2^2}{2}, \quad (2)$$

где $\frac{P}{\rho}$ – статический напор, соответствующий потенциальной энергии;

$\frac{V^2}{2}$ – скоростной напор, соответствующий кинетической энергии;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

$\frac{\xi V_2^2}{2}$ – потери кинетической энергии на участке I-II;

ξ – коэффициент сопротивления на участке I-II;

k_1 и k_2 – поправочные коэффициенты на неравномерность распределения скоростей в сечениях I - II.

Подставив в уравнение (2) значение скоростей V_1 из уравнения (1) и решив уравнение (2) относительно V_2 , получим

$$V_2 = \frac{\sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}, \quad (3)$$

где $\psi = \frac{P'_1 - P'_2}{P_1 - P_2}$ – коэффициент перехода от давлений в сечениях I и II к давлениям непосредственно до и после СУ.

С учетом уравнения объемного расхода для несжимаемой жидкости $Q_0 = V_2 S_2 = V_2 \mu S_0$, где Q_0 – м³/с, получим

$$Q_0 = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}. \quad (4)$$

Безразмерное выражение

$$\alpha = \frac{\mu \sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2 \mu^2}} \text{ – называют коэффициентом расхода диафрагм.}$$

Коэффициент расхода учитывает: 1) неравномерное распределение скоростей по сечению потока, обусловленное вязкостью жидкости и трением о стенки трубопровода; 2) измерение давления не в центре потока, а у стенок трубопровода; 3) введение в уравнение расхода сечения S_0 вместо неопреде-

ленного наименьшего сечения струи S_2 . Для сопел и труб Вентури сечение наиболее суженой части потока практически можно принять равным сечению цилиндрической части СУ, поэтому $\mu=1$ и $\alpha = \frac{\sqrt{\psi}}{\sqrt{\xi + k_2 - k_1 m^2}}$. Коэффициент α

для СУ различных типов определяется опытным путем. На основании опытных данных получены эмпирические формулы для расчетов.

Уравнение расхода для несжимаемой жидкости в объемных ($\text{м}^3/\text{с}$) и массовых ($\text{кг}/\text{с}$) единицах примет вид

$$Q_0 = \alpha S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)}; \quad (5)$$

$$Q_M = \alpha S_0 \sqrt{2\rho (P_1 - P_2)}.$$

При измерении расходов сжимаемых сред (газов и паров), необходимо учитывать уменьшение плотности ρ вследствие понижения давления при прохождении через СУ, в результате чего расход несколько уменьшится. Поэтому уравнение расхода запишем следующим образом

$$Q_0 = \alpha \varepsilon S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho_1} (P_1 - P_2)}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6)$$

$$Q_M = \alpha \varepsilon S_0 \sqrt{2\rho_1 (P_1 - P_2)}, \text{ кг}/\text{с}$$

где ρ_1 – плотность среды перед входом потока в отверстие диафрагмы;

ε – поправочный множитель на расширение измеряемой среды.

Для несжимаемой жидкости (воды) $\varepsilon = 1$, для газов и паров $\varepsilon < 1$ и зависит $\varepsilon = f\left(\frac{P_1 - P_2}{P_1}, m, \chi\right)$, где χ - показатель адиабаты.

Для удобства расчета в уравнениях расхода (6) S_0 заменяется на диаметр отверстия СУ – α . На практике удобнее пользоваться не секундным, а часовым расходом.

Если заменить $S_0 = \frac{\pi d^2}{4}$ и секунднй расход часовым, то формулы расхода можно уравнение переписать в виде

$$Q_0 = \frac{3600\pi\sqrt{2}}{4 \cdot 10^6} \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot k_t^2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho}} = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot k_t^2 \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho}} \quad (7)$$

$$Q_M = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot k_t \sqrt{\rho(P_1 - P_2)}$$

где d – диаметр отверстия переходного сечения СУ при рабочей температуре, мм;

ρ – плотность измеряемой среды, кг/м³;

$P_1 - P_2$ – перепад давления, Па.

Требования к изготовлению и установке стандартных сужающих устройств

Требования к изготовлению и установке, методика расчета СУ изложены в ГОСТ 8.563.1-97 «Измерение расхода и количества жидкостей и газов методом переменного перепада давления» (РД 50-213-80, правила 28-64, 27-54) введенного с 1.01.99 г.

При изготовлении и установке стандартных СУ в трубопроводах должны соблюдаться определенные требования, не соблюдение которых существенно влияют на погрешность измерения расхода.

Допустимые диапазоны значений внутренних диаметров трубопроводов при температуре $t = 20$ °С и относительных площадей диафрагм m должны находиться в пределах:

для диафрагм с угловым способом отбора ΔP

$$50 \text{ мм} \leq D_{20} \leq 1000 \text{ мм}$$

$$0,05 \leq m \leq 0,64$$

для диафрагм с фланцевым и трехкорпусным способом отбора ΔP

$$50 \text{ мм} \leq D_{20} \leq 760 \text{ мм}$$

$$0,05 \leq m \leq 0,56$$

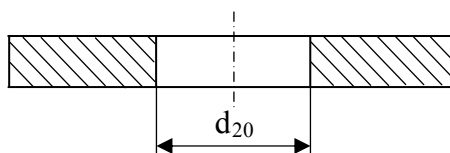
Диаметр отверстия диафрагм не зависимо от способа отбора ΔP

$$d_{20} \geq 12,5 \text{ мм.}$$

Что значит угловой и фланцевый способ отбора перепада давления?

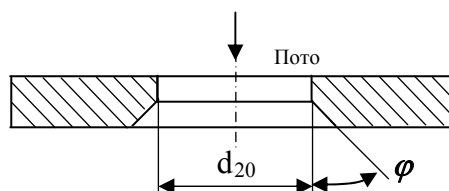
Диафрагма представляет собой тонкий диск, имеющий круглое отверстие d_{20} , центр которого должен совпадать с центром сечения трубы.

В тех случаях, когда толщина $b \leq 0,02D_{20}$ можно изготавливать диафрагму без конического расширения к выходу потока.



При толщине диафрагмы $b > 0,02D_{20}$ цилиндрическое отверстие должно выполняться с коническим расширением к выходу потока и углом наклона

$$30^\circ \leq \varphi \leq 45^\circ$$



Отверстие диафрагмы цилиндрической формы со стороны входа потока имеет прямоугольную острую кромку. Длина цилиндрического отверстия α должна находиться в пределах $0,005D_{20} \leq \alpha \leq 0,02D_{20}$.

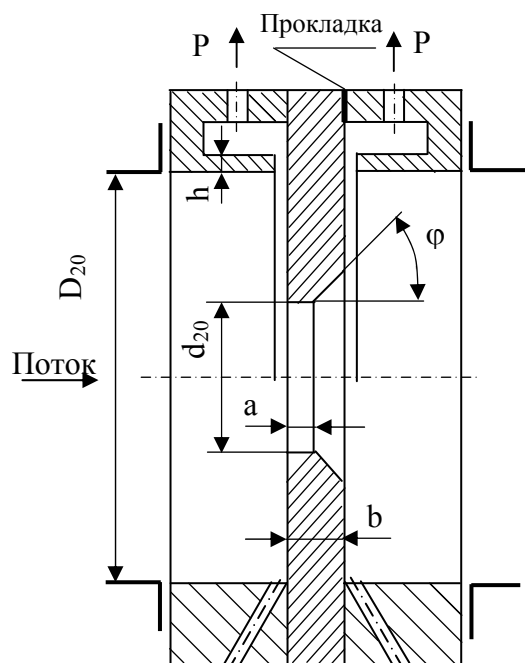


Рис. 1. Угловые способы отбора ΔP

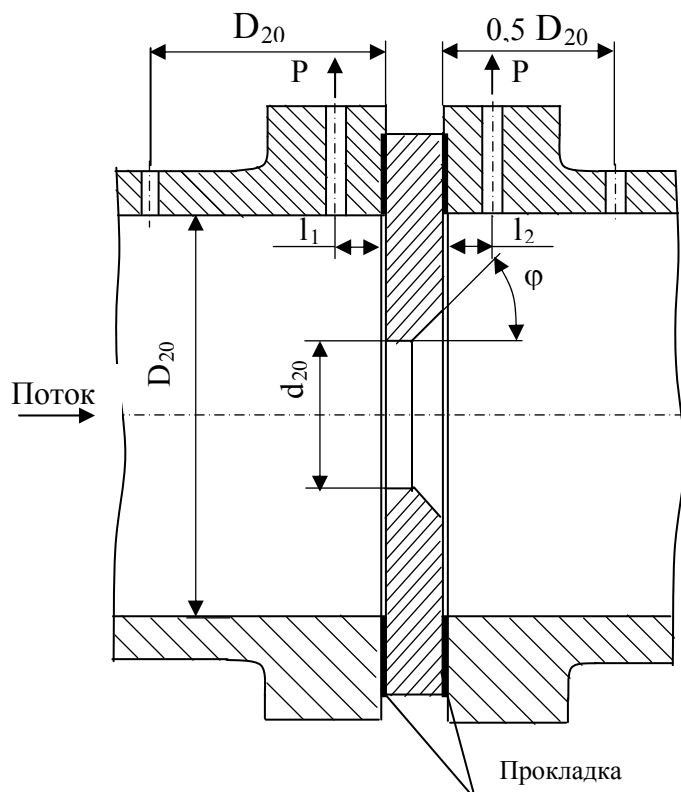


Рис. 2. Фланцевый способ отбора ΔP и трехрадиусный

Толщина диска диафрагмы b должна находиться в пределах от a до $0,05 D_{20}$, наиболее целесообразно иметь толщину в пределах $2,5 - 3 \leq b \leq 10 - 15$ мм.

Наименьшую необходимую толщину диска b при $\Delta P \geq 0,16$ МПа можно определить расчетным путем по формуле:

$$b_{min} \geq D_{20} \sqrt{\frac{\Delta P_b}{\sigma_T} (0,681 - 0,651 \cdot \sqrt{m})},$$

где m – модуль СУ,

ΔP – перепад давления,

σ_T – предел текучести материала диафрагмы при рабочей температуре, в Па.

Перепад давления ΔP при угловом способе отбора следует измерять через отдельные цилиндрические отверстия (низ рис.) или через две кольцевые камеры, каждая из которых соединена с внутренней полостью трубопровода кольцевой щелью или группой равномерно распределенных по окружности отверстий, число которых должно быть не менее 4 (верх рис.). Площадь каждого щелевого отверстия должна быть не менее 12 мм².

Размер c (диаметр отдельного отверстия, ширина отверстия или ширина кольцевой щели) при $m \leq 0,45$ $c \leq 0,03 D_{20}$

при $m > 0,45$ $0,01 D_{20} \leq c \leq 0,02 D_{20}$.

Одновременно следует соблюдать условия:

– для чистых жидкостей и газов $1 \text{ мм} \leq c \leq 10 \text{ мм}$;

– для паров и жидкостей, которые могут испаряться в соединительных линиях:

– при измерении ΔP через отдельные отверстия $4 \text{ мм} \leq c \leq 10 \text{ мм}$;

– при измерении ΔP через камеры $1 \text{ мм} \leq c \leq 10 \text{ мм}$.

Площадь сечения камеры, определенная по одну сторону от СУ должна быть не менее 1/2 площади кольцевой щели или группы отверстий. Математически это выражается так

$$f \cdot e \geq \frac{1}{2} \pi \cdot c \cdot D_{20} - \text{ для камер с кольцевой щелью};$$

$$f \cdot e \geq \frac{1}{2} n \cdot F - \text{ для камер с группой отверстий},$$

где n – число отверстий;

F – площадь одного отверстия;

f, e – соответственно высота и ширина камеры.

Толщина стенки корпуса камеры h выбирается из соотношения

$$h \leq 2 \cdot c$$

Перепад давления ΔP при фланцевом способе отбора следует измерять через отдельные цилиндрические отверстия на следующих расстояниях l_1 от входной плоскости диафрагмы вверх по потоку до СУ и l_2 от выходной плоскости диафрагмы вниз по потоку после СУ.

$$l_1 = l_2 = 25,4 \pm A \text{ мм},$$

$$\text{где } A = \begin{cases} 0,5 \text{ мм при } m > 0,36 \text{ и } 58 \text{ мм} < D_{20} < 150 \text{ мм} \\ 1 \text{ мм при } \begin{cases} m \leq 0,36 \\ m > 0,36 \text{ и } 50 \text{ мм} \leq D_{20} \leq 58 \text{ мм} \\ m > 0,36 \text{ и } 150 \text{ мм} \leq D_{20} \leq 700 \text{ мм}. \end{cases} \end{cases}$$

Оси отверстий для отбора давления до и после сужающего устройства могут находиться в разных меридиальных плоскостях. На приборостроительных заводах изготавливаются стандартные диафрагмы с кольцевыми камерами типа ДК для $D_y = 50 \div 500$ мм и $P_y \leq 100$ кгс/см², бескамерные типа ДБ для $D_y = 50 \div 1000$ мм и $P_y \leq 320$ кгс/см².

Для более высоких условных давлений, т.е. $P_y = 100 \div 400$ кгс/см² (10 – 40 МПа) ДК применяются также сварные соединения диафрагмы (СУ) и трубопровода. Сварные диафрагмы широко применяются на ТЭС высокого давления.

Изготовление сварных СУ производится на котельных заводах, а не на приборостроительных предприятиях.

Сопло

Допустимые диапазоны значений D_{20} и m должны находиться в пределах для измерения расхода газа (пара)

$$\begin{aligned} 0,50 \text{ мм} &\leq D_{20} \\ 0,09 &\leq m \leq 0,64 \end{aligned}$$

Профильная часть отверстия сопла должна быть выполнена с плавным сопряжением дуг радиусами

$$r_1 = 0,2 d_{20}; \quad r_2 = 0,333 d_{20} = d_{20}/3;$$

Привязочные размеры радиусов скружения

$$l = 0,304 d_{20}; \quad l_1 = 1,5 d_{20}; \quad l_2 = 0,3 d_{20};$$

$b \leq 0,1 D_{20}$ – толщина сопла;

$L = 0,604 d_{20}$ – длина сопла;

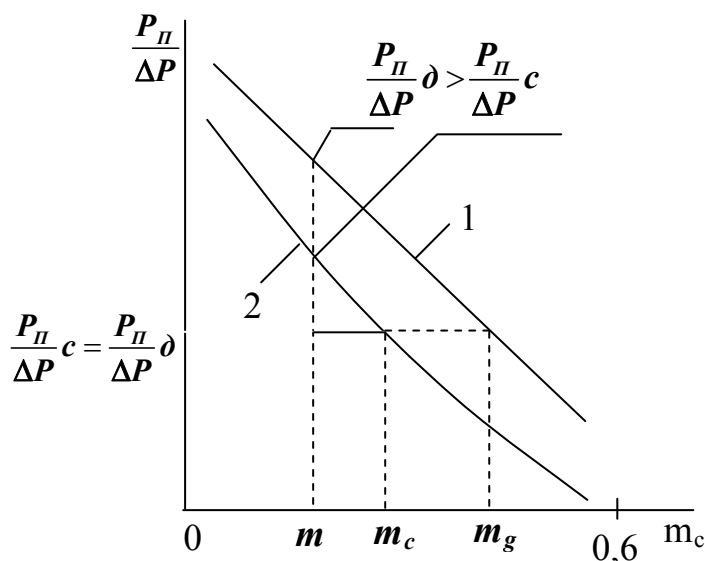
$n_1 \geq 0,03 d_{20}$ и $n \leq 0,03 d_{20}$ – размеры выходной проточки;

$x = 0,2d_{20} - \sqrt{0,75d_{20} \cdot D_{20} - 0,25D_{20}^2 - 0,5225d_{20}^2}$ — толщина сжатой прокладки.

Способ отбора ΔP производится через кольцевые камеры или через отдельные цилиндрические отверстия (первое предпочтительнее). Требования предъявляемые к кольцевым камерам и расчет размеров производится, так же как и для диафрагм. Способы крепления сопел, а также диапазон давления, для которых применяются соответствующие крепления такие же, как и у диафрагм, т.е. крепление между фланцами до $P_y < 100$ кгс/см² и сварные соединения для $P_y \geq 100$ кгс/см².

Потеря давления на СУ

При выборе СУ следует считаться с потерей давления P_{Π} измеряемой среды, так как давление за СУ полностью не восстанавливается. P_{Π} определяют как разность статических давлений между сечениями удаленными на $3 \cdot D_{20}$ перед СУ и на $6 \cdot D_{20}$ за ним. Она обычно выражается в долях от ΔP .



1 — для диафрагм;
2 — для сопел.

Из графика видно, что для одного и того же m потеря давления в диафрагмах больше чем в соплах. Однако следует отметить, что при равных перепадах давления ΔP и равных расходах среды значение m для диафрагмы больше, чем для сопла, поэтому P_{Π} практически при использовании диафрагм и сопел приблизительно равна $P_{\Pi}^{\delta} \approx P_{\Pi}^c$;

Потерю давления для диафрагм независимо от способов отбора ΔP определяют по формуле:

$$P_{\Pi} = \frac{1 - \alpha m}{1 + \alpha m} \cdot \Delta P, \text{ МПа}$$

для сопел

$$P_{\Pi} = (1 - 1,4m) \cdot \Delta P, \text{ МПа.}$$

Допустимая потеря давления может быть найдена из технологических расчетов или задана из практических соображений ($P_{\Pi д}$). Расчетная величина потери давления $P_{\Pi} \leq P_{\Pi д}$.

Коэффициент расхода

Коэффициент расхода стандартных СУ как уже говорилось, определяется экспериментальным путем. Но для всего многообразия потоков опреде-

лить α экспериментально практически невозможно. Поэтому для определения α применяют теорию подобия, в соответствии с которой α двух СУ будут равными при условии их геометрического подобия и гидродинамического подобия потоков.

Геометрическое подобие СУ имеет место при подобии их геометрических форм и равенство относительных площадей m . Два потока подобны, если равны их числа Рейнольдса Re и одинаковы профили скоростей. Отсюда следует, что

$$\alpha = f(Re, m, \text{тип СУ})$$

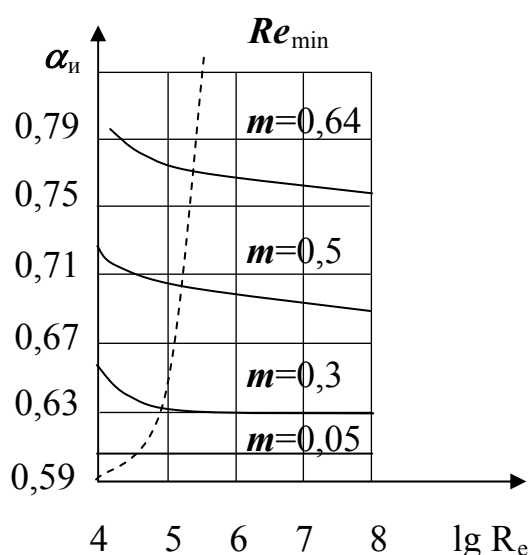
Число Re является безразмерным критерием гидродинамического подобия потоков и представляет собой отношение сил инерции к силам вязкости потоков.

Число Рейнольдса Re , отнесенное к D трубопровода определяется по следующим формулам:

$$\text{для } Q_0 - Re = 0,354 \frac{Q_0}{Dv} = 0,354 \frac{Q_0 \rho}{D\mu},$$

$$\text{для } Q_M - Re = 0,354 \frac{Q_M}{D\rho v} = 0,354 \frac{Q_M}{D\mu} - \text{при изменении } \nu \text{ (кинетическая вязкость воды в м}^2/\text{с) и } \mu \text{ (динамическая вязкость в Па}\cdot\text{с)}$$

Существующие конструкции стандартных СУ обеспечивают практически постоянное значение исходного коэффициента расхода α только в определенном диапазоне изменения расхода (точнее в определенном интервале чисел Re).



Зависимость $d_u = f(Re)$ при различных m для диафрагм с угловым способом отбора.

То значение Re , начиная от которого коэффициент расхода α при дальнейшем увеличении Re не изменяет своего значения, называется минимальным числом Рейнольдса и обозначается Re_{min} .

Если в результате расчета $Re > Re_{min}$, значит расчет можно продолжать.

Коэффициент расхода в реальных условиях несколько уменьшается с ростом Re , что учитывается при расчете α .

Таким образом, коэффициент расхода диафрагмы с угловым способом отбора в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_{\min} \leq Re \leq 10^8$ определяют по формуле:

$$\alpha_y = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \left[0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4 + 0,0029m^{1,25} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,75} \right].$$

Значение Re_{\min} выбирают в зависимости от m

$$\text{для } 0,05 \leq m \leq 0,2 \quad Re_{\min} = 5 \cdot 10^3;$$

$$\text{для } 0,2 < m \leq 0,59 \quad Re_{\min} = 10^4;$$

$$\text{для } 0,59 < m \leq 0,64 \quad Re_{\min} = 2 \cdot 10^4.$$

α для диафрагм с фланцевым способом отбора в диапазоне чисел Рейнольдса для $Re_{\min} \leq Re \leq 10^8$, где $Re_{\min} = 1260 \cdot m \cdot D$ определяется по формуле

$$\alpha_y = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \left[0,5959 + 0,0312m^{1,05} - 0,184m^4 + 0,0029m^{1,25} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,75} + \right. \\ \left. + 0,09l_1m^2(1-m^2)^{-1} - 0,0337l_2m^{1,5} \right].$$

Значение постоянных l_1 и l_2 определяют

$$l_1 = l_2 = 25,4/D \text{ при } D > 58,62 \text{ мм.}$$

α для сопел и сопел Вентури определяют в диапазоне чисел Рейнольдса $Re_{\min} \leq Re \leq 2 \cdot 10^6$ по формуле

$$\alpha_c = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} \left[0,99 + 0,2262m^{2,65} + (0,000215 - 0,001125m^{0,5} + 0,00249m^{2,35}) \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{1,15} \right]$$

Значение Re_{\min} выбирают в зависимости от m

$$\text{для } 0,05 \leq m \leq 0,2 \quad Re_{\min} = 7 \cdot 10^4;$$

$$\text{для } 0,2 < m \leq 0,6 \quad Re_{\min} = 2 \cdot 10^4.$$

На гидродинамику потока влияет шероховатость трубопровода, причем степень этого влияния определяется внутренним диаметром трубопровода.

Кроме того, для реальных диафрагм входные кромки не являются идеально прямоугольными (существует притупление входной кромки). Это делает невозможным идеальное геометрическое подобие 2-х диафрагм с одинаковыми m . Поэтому в теории расходомеров введено понятие «исходный коэффициент расхода $\alpha_{и}$ » – коэффициент расхода СУ идеальной формы.

Вышеприведенные зависимости α являются исходными коэффициентами расхода.

Реально расчетный коэффициент расхода α через исходный коэффициент расхода $\alpha_{и}$ определяется по формулам:

$$\begin{aligned} \text{для диафрагм } \alpha &= \alpha_{и} \cdot \kappa_{ш} \cdot \kappa_{п}, \text{ где } \alpha_{и} = \alpha_{у}; \alpha_{и} = \alpha_{ф}, \\ \text{для сопел и сопел Вентури } \alpha &= \alpha_{и} \cdot \kappa_{ш}, \alpha_{и} = \alpha_{с}, \end{aligned}$$

где $\kappa_{ш}$ – поправочный множитель по шероховатости;

$\kappa_{п}$ – поправочный множитель на притупление входной кромки диафрагмы.

Реально существующая шероховатость трубопровода заостряет профиль скоростей и несколько увеличивает коэффициент расхода α , следовательно, значение $\kappa_{ш}$ для всех типов СУ увеличивается с уменьшением диаметра трубопровода и увеличением m .

Следовательно, $\kappa_{ш} = f(D, m, \text{тип СУ})$ и рассчитывается по различным эмпирическим формулам в зависимости от СУ.

Значение $\kappa_{п}$ зависит от диаметра трубопровода и m , то есть увеличивается с уменьшением D и m , следовательно, $\kappa_{п} = f(D, m)$ и рассчитывается по эмпирическим формулам.

Поправочный множитель ε на расширение измеряемой среды

Поправочный множитель ε вводится в уравнение расхода вследствие изменения плотности газа при прохождении через СУ. В общем случае ε зависит

$$\varepsilon = f\left(\frac{\Delta P}{P}, m, \chi, \text{тип СУ}\right) \leq 1$$

где ΔP – перепад давления;

P – абсолютное давление среды до СУ;

m – модуль СУ;

χ – показатель адиабаты.

При одинаковых $\frac{\Delta P}{P}$ для диафрагм ε всегда больше, чем для сопла, вследствие радиального расширения струи, приводящего к увеличению площади ее суженной части.

При малых $\frac{\Delta P}{P}$ значение ε близко к 1. В большинстве случаев $\frac{\Delta P}{P} \leq 0,05$ при этом

для сопел $\varepsilon > 0,94$,

для диафрагм $\varepsilon > 0,97$.

ε для диафрагм с угловым и фланцевым способом отбора определяется по формуле:

$$\varepsilon = 1 - (0,41 + 0,35m^2) \cdot \frac{\Delta P}{P} \cdot \frac{1}{\chi},$$

для сопел и сопел Вентури

$$\varepsilon = \left[\frac{(1-m^2) \left(\frac{\chi}{\chi-1} \right)}{1-m^2 \psi^{2/\chi}} \cdot \psi^{\frac{2}{\chi}} \cdot \frac{1-\psi^{\frac{\chi-1}{\chi}}}{\frac{\Delta P}{P}} \right]^{0,5},$$

где $\psi = 1 - \left(\frac{\Delta P_H}{P} \right)$, ΔP и P в Па.

Для несжимаемых сред (питательная вода) $\varepsilon = 1$.

Диаметры трубопровода и СУ обычно измеряются при $t = 20^\circ\text{C}$ и обозначаются соответственно D_{20} и d_{20} . Входящие в уравнения расхода диаметры при рабочей температуре определяются по формулам:

$$\begin{aligned} d &= d_{20} k_t' \\ D &= D_{20} k_t'' \end{aligned}$$

где k_t' и k_t'' – поправочные множители на расширение материала СУ и трубопровода.

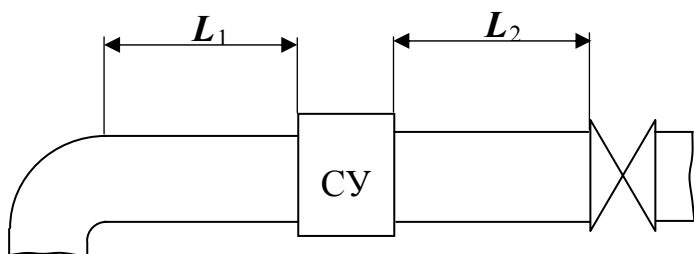
Если температура контролируемой среды находится в интервале от -20°C до $+60^\circ\text{C}$, то $k_t' = k_t'' = 1$.

Требования к установке СУ для измерения расхода различных сред

При установке СУ необходимо соблюдать ряд условий значительно влияющих на погрешность измерения расхода. СУ должно располагаться перпендикулярно оси трубопровода. Неперпендикулярность не должна превышать 1° .

Важным условием является необходимость обеспечения установившегося течения потока перед входом в СУ и после него. Длина этих участков до

СУ и после него должна быть такой, чтобы искажения потока, вносимые коленами, вентилями, тройниками и другими гидравлическими сопротивлениями могли сгладиться до подхода потока к СУ. Особенно это сказывается на входном участке СУ, поэтому задвижки и вентили, особенно регулирующие, рекомендуется устанавливать после СУ, то $L_1 = f(m, D_{20}$, вид местного сопротивления)



Минимальная относительная длина L_1/D_{20} прямых участков до СУ

Местные сопротивления	$m = d^2/D_{20}$			
	0,05	0,3	0,5	0,64
Колено или тройник	10	16	28	46
Группа колен в одной плоскости	14	22	36	50
Полностью открытые задвижки	12	14	20	30
Гильза термометра диаметром $d \leq 0,03 D_{20}$	5	5	5	5

Длина прямого участка L_2 после СУ зависит только от числа m . Для $m = 0,05$ $L_2 = 4D_{20}$ и при $m = 0,64$ $L_2 = 8,2D_{20}$, а в среднем $L_2 = 6D_{20}$.

Как производится отбор P_1 и P_2 мы уже говорили. Дифманометр подключается к СУ двумя соединительными линиями (импульсными трубками) с внутренним диаметром не менее 8 мм ($D_n \times S = 14 \times 2$). Допускаемая длина соединительных линий до 50 м, однако из-за возникновения большой динамической погрешности не рекомендуется использовать линии длиной более 15 м.

Линии по которым ΔP от СУ передается к дифманометру (ДМ) не должны вносить дополнительных погрешностей в измерение расхода, поэтому они заполняются однофазной средой одинаковой плотности в обеих линиях. При измерении расхода жидкости в них должны отсутствовать «газовые мешки», а при измерении расхода газа - скопление конденсата. Для этого соединительные линии должны быть либо вертикальными, либо наклонными с уклоном не менее 1 : 10, причем на концах наклонных участков должны быть

газо – или конденсатосборники. Импульсные трубки должны располагаться рядом, чтобы избежать неодинакового их нагрева или охлаждения, что может привести к неодинаковой плотности среды в них и, следовательно, к дополнительной погрешности. При измерении расхода пара важно обеспечить равенство и постоянство уровней конденсата в обеих линиях, что достигается применением конденсационных сосудов.

К одному СУ может быть подключено несколько ДМ. При этом допускается подключение соединительных линий одного ДМ к соединительным линиям другого ДМ.

Измерение расхода жидкости

При измерении расхода жидкости ДМ рекомендуется устанавливать ниже СУ, а отбор ΔP – ниже осевой линии, но не в самой низкой точке.

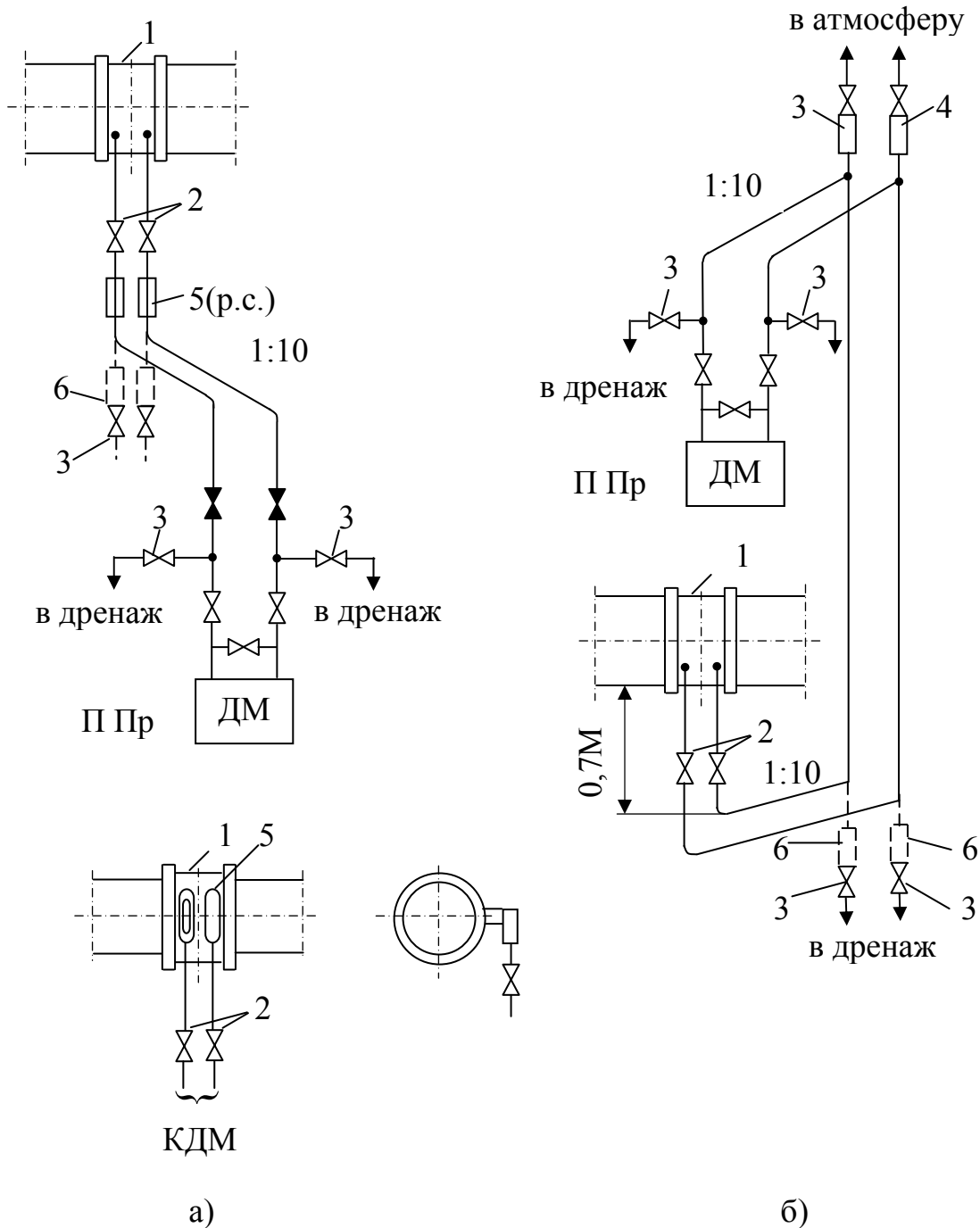


Рис. Схема соединительных линий при измерении расхода жидкости с расположением дифманометра ниже (а) и выше (б) сужающего устройства

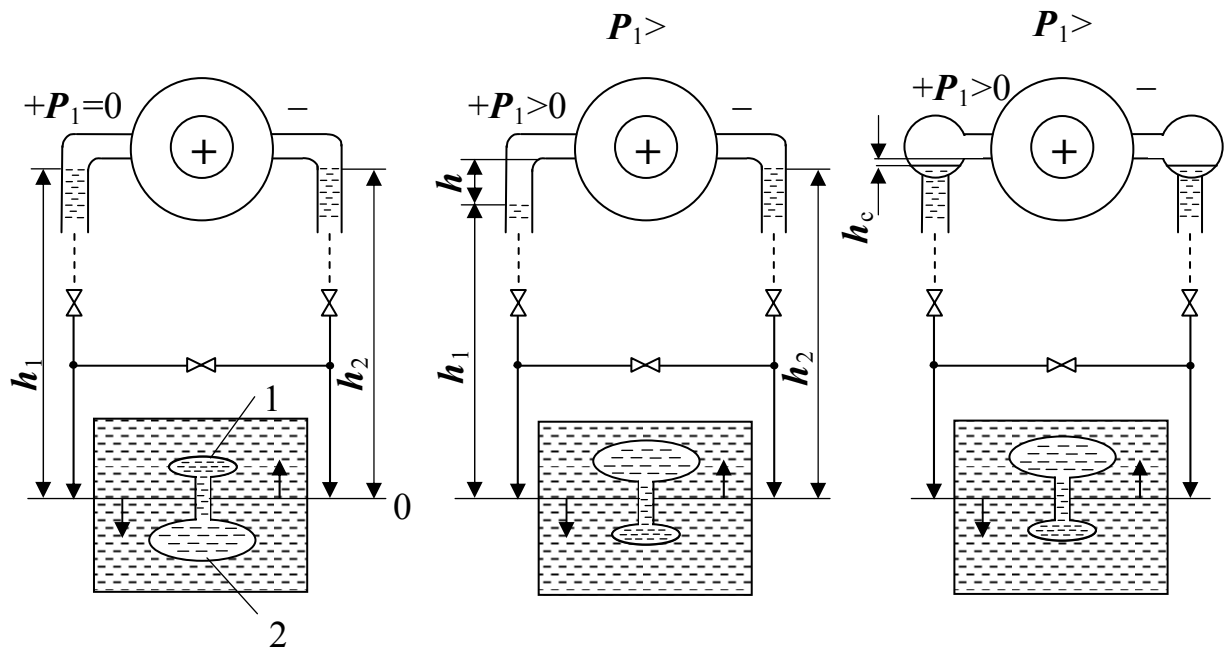
1 – СУ; 2 – запорный вентиль; 3 – продувочный вентиль; 4 – газосборник; 5 – уравнительный или разделительный сосуд; 6 – отстойный сосуд.

При $t_{ж} \geq 120^{\circ} \text{C}$ для уменьшения дополнительной погрешности применяются дополнительные сосуды. При измерении агрессивной жидкости устанавливаются разделительные сосуды.

Измерение расхода перегретого пара

При измерении расхода перегретого пара неизолированные соединительные линии оказываются заполненными конденсатором. Очевидно, что во избежание дополнительной гидростатической погрешности уровень конденсата и его температура в обеих линиях должны быть одинаковыми при любом расходе. Для стабилизации верхних уровней конденсата в обеих соединительных линиях вблизи СУ устанавливаются конденсационные сосуды.

За счет чего же получается дополнительная гидростатическая погрешность?



$Q = 0; h_1 = h_2; \Delta P = 0;$
1 – сжаты; 2 – растянуты.

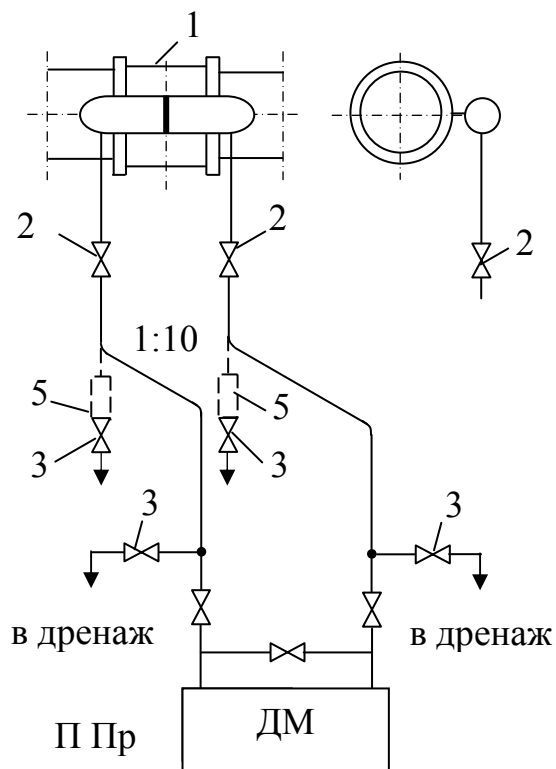
$Q \neq 0; \Delta P \neq 0;$
 $h = h_1 - h_2;$
конденсат вытечет
 $\Delta P_g = \Delta P - h \rho g,$
т.е. показания ДМ
будут занижены.

$Q \neq 0; \Delta P \neq 0;$
 $h_c = h_2 - h_1;$
 $h_c \ll h.$

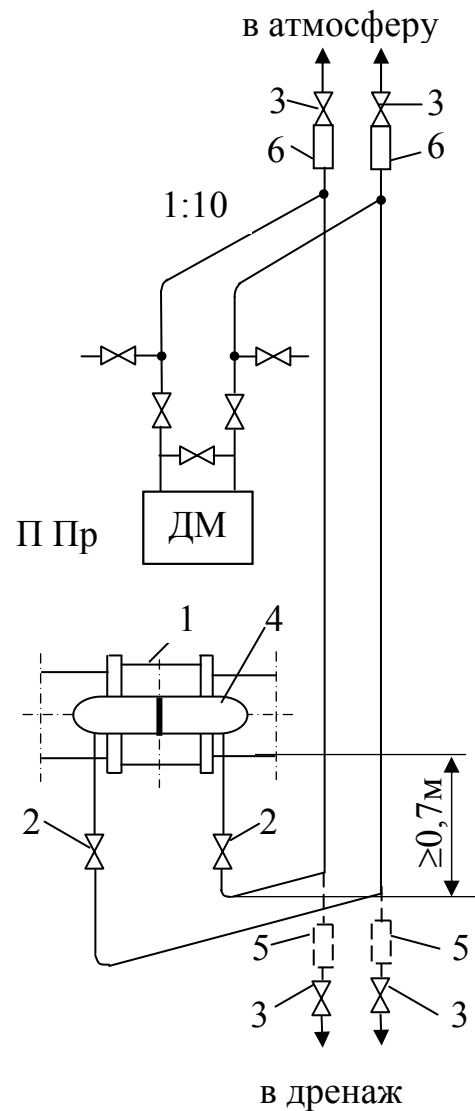
Что нетрудно заметить, абсолютное значение гидростатической погрешности будет расти с увеличением расхода, так как при этом будет расти h . Следовательно, погрешность можно снизить уменьшением h . Для этого вблизи СУ на концах импульсных трубок устанавливают конденсационные сосуды, горизонтально расположенные цилиндры большого сечения. Отбор ΔP по осевой или выше.

При измерении расхода пара ДМ следует располагать ниже СУ и конденсационных сосудов, для облегчения удаления воздуха из соединительных линий. Допускается и выше, но в верхней точке соединительных линий нужно установить газоразборники.

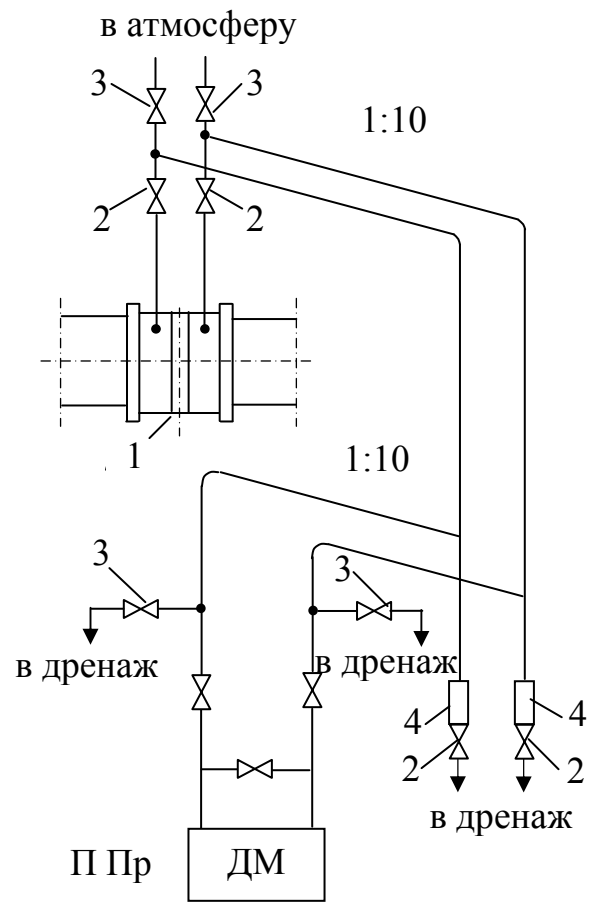
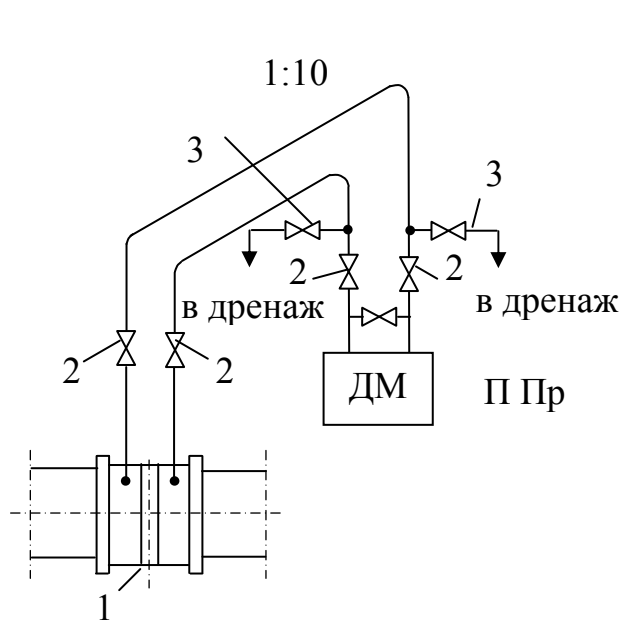
Схемы соединительных линий для измерения расхода перегретого пара



1. СУ
2. Запорный вентиль
3. Продувной вентиль
4. Конденсационный сосуд
5. Отстойник
6. Газосборники



При измерении расхода газа – ДМ рекомендуется устанавливать выше СУ, чтобы конденсат образовавшийся в соединительных линиях стекал в трубопровод, отбор ΔP в верхней половине трубопровода, прокладку соединительных линий желательно производить вертикально или с наклоном в сторону трубопровода.



Особые случаи измерения расхода с помощью СУ

Измерение при низких числах Re

На практике возникает необходимость измерения расхода сред с повышенной вязкостью. В этих случаях использование стандартных СУ часто оказывается невозможным.

При малых числах Re можно применить нестандартные СУ, обладающие постоянным α в достаточно широком интервале чисел Re . К таким устройствам относятся:

- сдвоенные (двойные) диафрагмы;
- сопла «четверть круга».

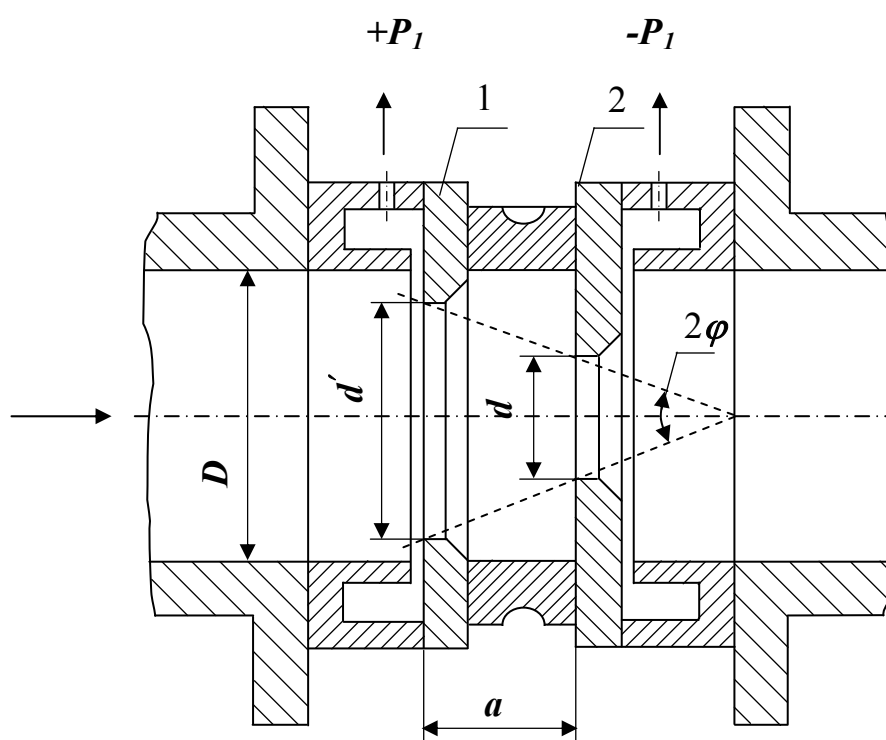


Рис. Сдвоенные диафрагмы

Сдвоенные диафрагмы – это последовательно расположенные стандартные диафрагмы. Первая диафрагма с большим диаметром d' расположена на расстоянии $a = (0,2 \div 0,8)D$ от второй с диаметром d .

$$\Delta P = P_1 - P_2;$$

Основной диафрагмой является вторая, расчеты ведутся по ней. Размеры первой диафрагмы устанавливаются в зависимости от второй и расстояния a .

Первая диафрагма направляет поток во вторую, основную диафрагму. В результате получается СУ со своеобразным коническим входом, который характеризуется углом 2φ

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{d' - d}{2a};$$

Для фиксированного расстояния a между диафрагмами угол φ для всех m сохраняет приблизительно постоянное значение. Так для $a = 0,3D$ $\varphi = 21 \pm 3^\circ$ с увеличением a угол уменьшается.

Постоянство угла φ определяет и постоянство коэффициента сужения μ двойной диафрагмы и равного $\mu = 0,69 \div 0,71$ для всех отношений d/D от $0,2 \div 0,75$. Этим двойная диафрагма существенно отличается от стандартной диафрагмы, ($\mu_n = 0,6 \div 0,78$).

В результате опытов при $a = 0,3D$ получено

m	0,1	0,3	0,6
α	0,694	0,71	0,798
R_{min}	2000	5000	29000
d'/D	0,55	0,82	0,965

$$R_{min}(2 \cdot 10^4)$$

Коэффициент расхода α для промежуточных значений можно получить по формуле

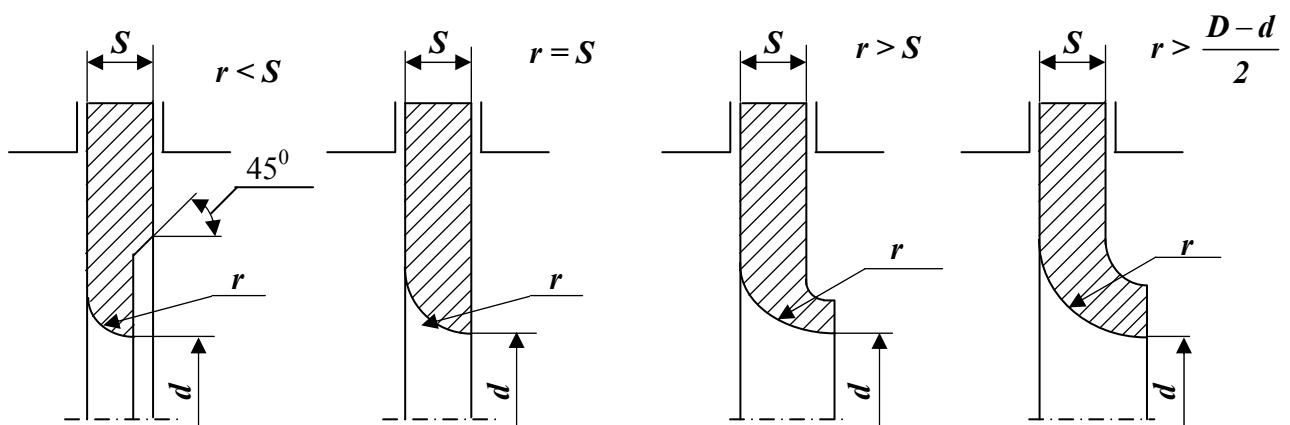
$$\alpha = 0,692 + 0,11 m^2 + 0,3 m^3,$$

погрешность которой не превосходит $\pm 0,2\%$.

Постоянству α в области малых чисел Re в двойных диафрагмах способствует и турбулизация потока, возникающая в зоне между диафрагмами, обеспечивающая постоянство коэффициента трения.

Затупление острой кромки второй диафрагмы уменьшает α , затупление кромки второй диафрагмы увеличивает α . При затуплении обеих кромок $\alpha = \text{const}$. Это серьезное преимущество двойных диафрагм. Необходимые длины прямых участков перед двойной диафрагмой $\sim 10\%$ меньше.

Сопло «четверть круга»



На всех рисунках профиль сужающей части сопла описывается дугой радиуса r , который зависит от диаметра d .

Если центр радиуса находится в пределах диаметра трубопровода, то профиль описывается дугой, равной четвертой части окружности. Отсюда и название.

Постоянство α у сопел четверть круга, как показали эксперименты в сильной степени зависит от правильного выбора отношения r/d .

В результате опытов установлено

m	0,0506	0,36	0,49
α	0,771	0,933	1,012
Re_{min}	700	300	200
r'/d	0,1	0,208	0,446

Наиболее широкое распространение сопла «четверть круга» нашли при измерении расхода мазута, который служит для растопки котлов или как основное топливо. При расчете нестандартных СУ рекомендуется пользоваться РД 50-411-83 «Расчет и инструктирование специальных СУ расходомеров для измерения расхода при малых числах Re » - 1983 г. или Файерштейн Л.М. и др. Справочник по автоматизации котельных. - М.: Энергоатомиздат, - 1985 г.

Кроме вышеуказанных нестандартных СУ для измерения расхода методом переменного перепада давления применяются:

- 1) диафрагмы с входным конусом;
- 2) диафрагмы с двойным конусом;
- 3) комбинированные и цилиндрические сопла;
- 4) сопло «половина круга»
- 5) сегментные и эксцентрические сопла;
- 6) щелевые диафрагмы.

Оценка погрешности измерения расхода

Запишем уравнение расхода

$$Q_0 = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\Delta P / \rho}, \text{ м}^3/\text{ч},$$

$$Q_M = 3,9986 \cdot 10^{-3} \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \sqrt{\rho \cdot \Delta P}, \text{ кг/ч},$$

и внимательно посмотрев на него нетрудно сделать вывод, что значение расхода является результатом косвенных измерений нескольких величин.

Следовательно, погрешность измерения расхода может быть определена лишь тогда, когда определены погрешности всех величин входящих в

уравнение расхода. Уравнение расхода содержит две группы величин, а именно:

- 1) величины, которые были найдены путем обработки большого числа измерений α и ε ,
- 2) величины, измеряемые, как правило, однократно или определяемые по справочным данным ΔP , ρ .

Для первой группы величин известны зависимости среднеквадратических относительных погрешностей σ_d и σ_ε , для второй - максимальные приведенные погрешности $\delta_d, \delta_{\Delta P}, \delta_\rho$ и т.д. Суммирование среднеквадратических погрешностей с максимальными приведенными погрешностями недопустимо, а возможно суммирование только среднеквадратических погрешностей по формуле:

$$\sigma_{Q_M} = \left[\left(\frac{\partial Q_M}{\partial \alpha} \sigma_\alpha \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_M}{\partial \varepsilon} \sigma_\varepsilon \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_M}{\partial d} \sigma_d \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_M}{\partial \rho} \sigma_\rho \right)^2 + \left(\frac{\partial Q_M}{\partial (\Delta P)} \sigma_{\Delta P} \right)^2 \right]^{0,5}$$

Поэтому для возможности использования этой формулы принимаются в руководящем документе следующие допущения:

- 1) составляющие погрешности не имеют корреляционной связи и считаются независимыми друг от друга;
- 2) закон распределения составляющих погрешностей принимают нормальным (закон Гаусса);
- 3) предельную погрешность измерения принимают равной максимальной погрешности однократного измерения при доверительной вероятности 0,95, при этом $\delta = 2\sigma$;
- 4) составляющей или совокупностью составляющих погрешностей равных или менее 3% результирующей погрешности пренебрегают.

Таким образом, значения $\sigma_d, \sigma_\rho, \sigma_{\Delta P}$ будут равны

$$\sigma_d = \frac{\delta_d}{2}; \quad \sigma_\rho = \frac{\delta_\rho}{2}; \quad \sigma_{\Delta P} = \frac{\delta_{\Delta P}}{2};$$

Обычно дифманометры – расходомеры снабжаются квадратичным ленточным или электронным квадратом для извлечения квадратного корня из измеряемого ΔP , для получения равномерной по расходу шкалы. В этом случае класс точности дифманометра характеризует погрешность измерения

$\sqrt{\Delta P}$, а не ΔP , поэтому в формуле слагаемое $\left(\frac{\partial Q_M}{\partial (\Delta P)} \sigma_{\Delta P} \right)^2$ следует заменить на $\left(\frac{\partial Q_M}{\partial (\sqrt{\Delta P})} \cdot \sigma_{\sqrt{\Delta P}} \right)^2$, причем $\sigma_{\Delta P} = \delta_{\sqrt{\Delta P}} / 2$.

Вычисляя производные получим среднюю квадратическую относительную погрешность (КОП) измерения расхода

$$\sigma_{Q_M} = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + (2\sigma_d)^2 + \left(\frac{\sigma_\rho}{2}\right)^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2}$$

При изготовлении СУ принимаются очень маленькие значения допусков на диаметр отверстия d .

$$\text{при } m \geq 0,45 \quad \Delta d_{20} = 0,0005d_{20}$$

$$\text{при } m < 0,45 \quad \Delta d_{20} = 0,001d_{20},$$

Поэтому σ_d оказываются пренебрежимо малыми по сравнению с остальными слагаемыми и их можно исключить.

Окончательно среднеквадратическую погрешность запишем так

$$\sigma_{QM} = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + 0,25\sigma_\rho^2 + \sigma_{\sqrt{\Delta P}}^2}, \%$$

Предельная относительная погрешность δ_σ измерения расхода определяется как удвоенная среднеквадратическая погрешность

$$\delta_\sigma = 2 \cdot \sigma_Q, \%$$

Промежуточные преобразователи перепада давления в электрический сигнал

Преобразователи предназначены для работы в системах автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами и обеспечивают непрерывное преобразование значения ΔP в унифицированный электрический сигнал.

Структурные схемы систем дистанционного автоматического контроля расхода методом переменного перепада давлений (ΔP) имеют вид:



Промежуточные преобразователи (ПП) и блоки питания и извлечения корня не имеют шкалы и служат только для преобразования ΔP в электрический сигнал, удобный для передачи на значительные расстояния.

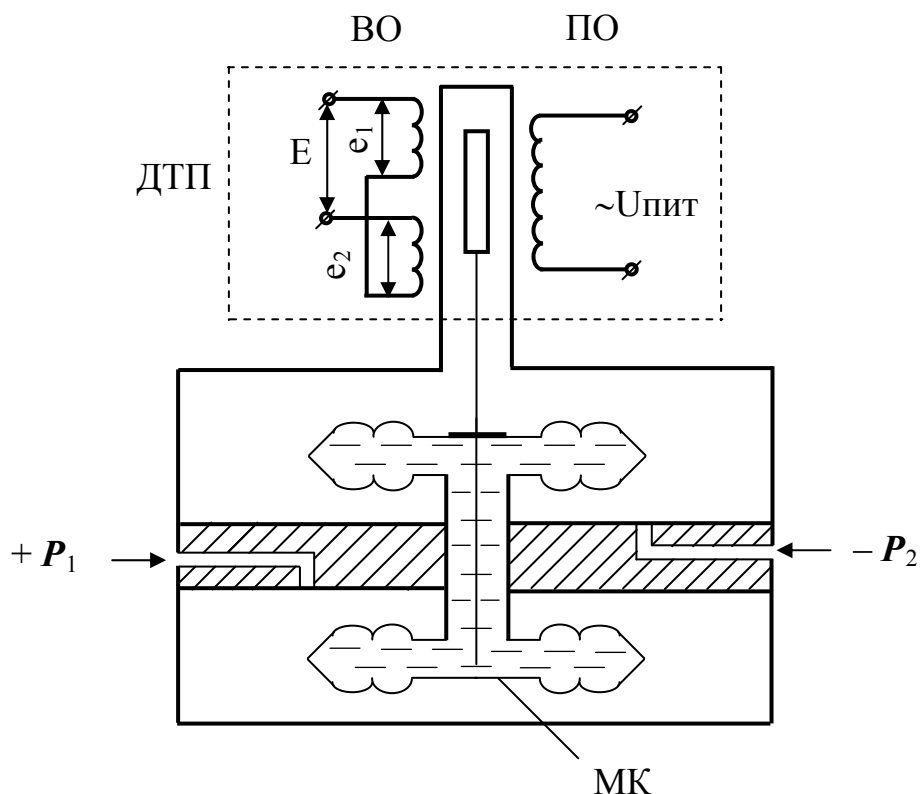
По 1-ой структурной схеме включаются ПП типа ДМ и ДМЭР, по 2-ой ПП типа «Сапфир – 22ДД» и «Метран – 43ДД».

ПП типа ДМ – 3583 (дифманометр) оснащен дифференциально-трансформаторным преобразователем, который преобразует ΔP в выходной сигнал взаимной индуктивности M , изменяющейся от 0 до 10 мГн. Питание первичной обмотки ДТП дифманометра осуществляется от ВП и регулирующего устройства.

Предел допускаемой основной погрешности дифманометра в % от предельного ΔP_n и вариации составляет $\pm 1,5\%$.

Работают ДМ в комплекте с ИП, имеющими приемные ДТП типа КСД, КПД, ВМД и т.п. ДМ состоит из герметичного корпуса, УЧЭ, представляющего собой сдвоенную мембранную коробку (МК) и ДТП. В верхнюю камеру подается отрицательное давление – P_2 , т.е. давление после СУ, в нижнюю – +

P_1 , т.е. давление до СУ. Внутренняя полость МК заполнена дистиллированной водой.



При увеличении давления P_1 нижняя коробка сжимается и часть жидкости перетекает в верхнюю коробку, раздувая ее. Разность давлений $P_1 - P_2$ уравнивается упругими силами МК. Верхняя МК перемещает стержень с плунжером в разделительной трубке, с внешней стороны которой располагается ДТП, который соединяется с ИП.

Нижняя МК имеет малую жесткость, и с ее помощью осуществляется компенсация температурных изменений объема жидкости, находящегося внутри мембранного блока.

Первичные преобразователи типов ДСЭР-МИ, ДМЭР с компенсацией магнитных потоков предназначены для преобразования ΔP в унифицированный токовый выходной сигнал 0-5 мА, 4-20 мА. Питание дифманометров осуществляется от сети переменного тока напряжением $\sim 220\text{В}$, 50 Гц.

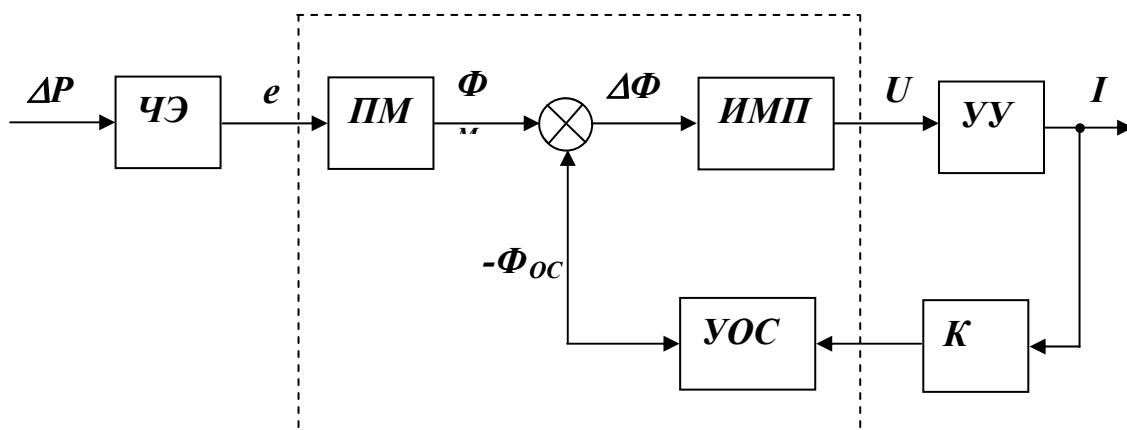
Предел допускаемой основной погрешности дифманометров в диапазоне измерения расхода от 30 до 100% составляет $\pm 0,6$; 1; 1,5%, в диапазоне измерения (например ДМЭР-МИ) 0 до 30% - ± 5 . Вариация выходного сигнала не превышает абсолютного значения допускаемой основной погрешности, то есть 0,6; 1; 1,5%.

Работают ДМЭРы и ДСЭРы в комплекте с ИП принимающими на вход унифицированные токовые сигналы, например, А100, А100Н, Диск - 250, РП 160, КСУ, КПУ и т.п.

Дифманометры состоят из следующих основных узлов:

- измерительного блока с вентильной головкой;
- магнитомодуляционного преобразователя (ММП);
- усилительного устройства.

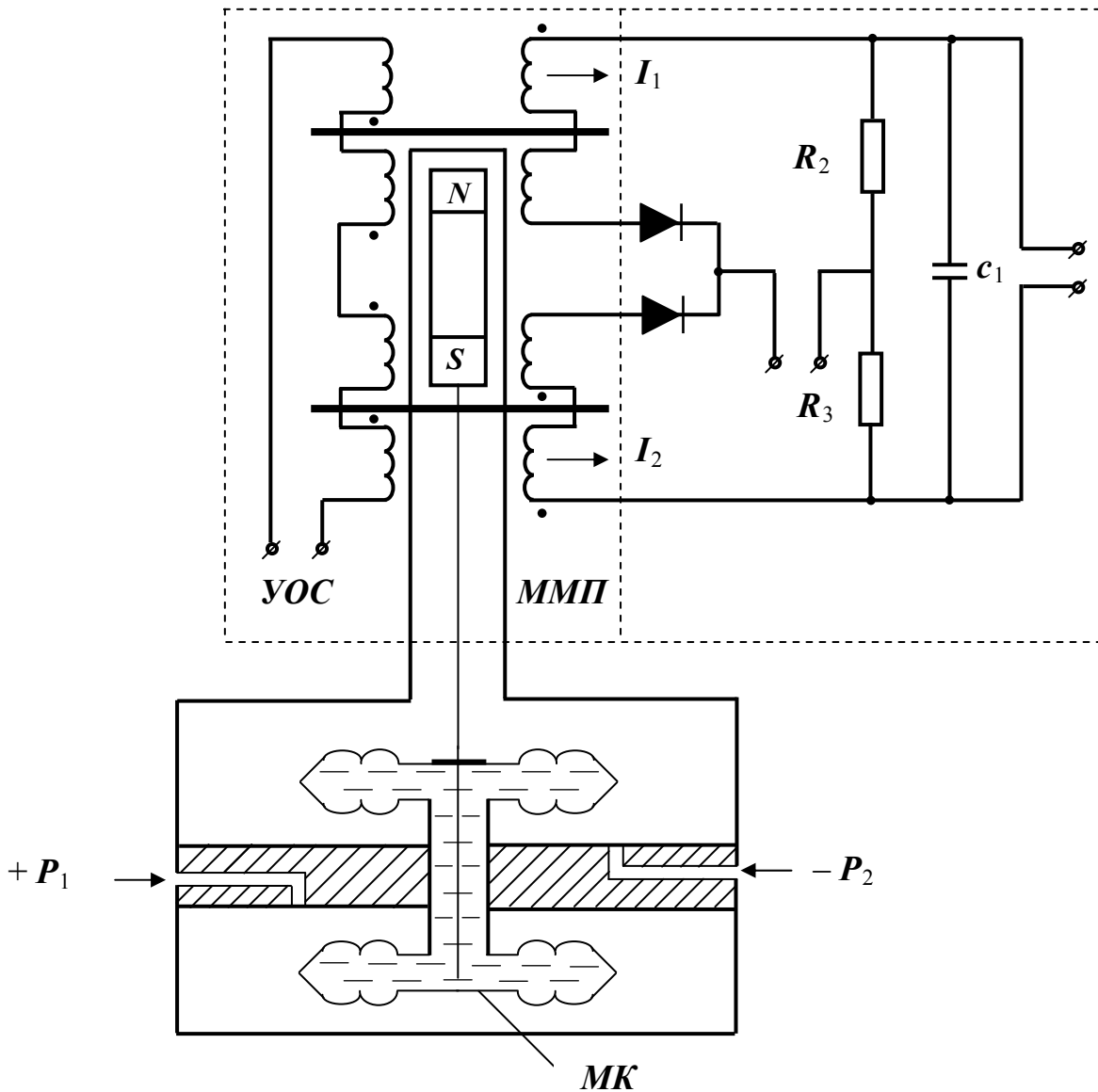
Основными функциональными элементами схемы являются:



- чувствительный элемент (**ЧЭ**), преобразующий измеряемый параметр (ΔP) в перемещение (e);
- постоянный магнит (**ПМ**), преобразующий перемещение в управляющий магнитный поток (Φ_M);
- индикатор магнитных потоков (**ИМП**), преобразующий разность Φ_M и потока обратной связи Φ_{OC} в электрический сигнал рассогласования в виде напряжения U ;
- усилительное устройство (**УУ**), предназначенное для усиления сигнала рассогласования U и получения выходного сигнала постоянного тока I ;
- устройство обратной связи (**УОС**), предназначенное для создания магнитного потока обратной связи Φ_{OC} при протекании в нем выходного сигнала I ;
- квадратор (**К**), предназначенный для извлечения корня квадратного из значения выходного сигнала I ;

Измерительный блок ДМЭРа работает также, как и ИБ дифманометра типа ДМ и перемещает постоянный магнит ММП, который включается в мостовую схему и работает по принципу компенсации магнитных потоков. Масса – 10,5 кг.

Принцип работы преобразователей с компенсацией магнитных потоков изложен в разделе

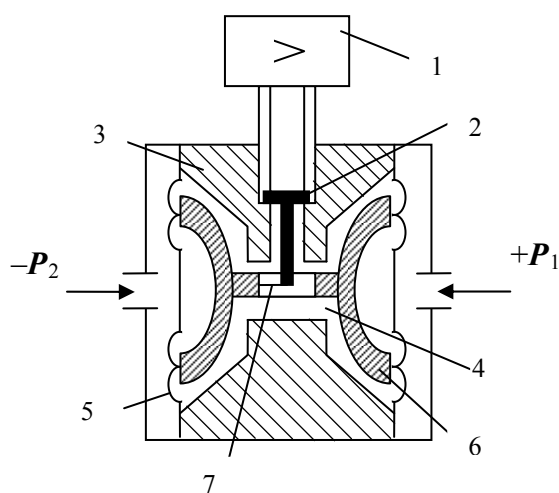


Мостовая схема включения ММП

Первичные преобразователи типа «Сапфир – 22ДД» в комплекте с блоком питания и извлечения корня (например, БИК – 1, БПК – 24К) предназначены для преобразования ΔP в унифицированный токовый сигнал 0 – 5, 0 – 20 и 4 – 20 мА, при этом получается линейная зависимость между выходным сигналом и измеряемым расходом. Блок питания работает на напряжении 220 В, 50 Гц.

Предел допускаемой основной погрешности и вариации составляет $\pm 0,25\%$ или $\pm 0,5\%$.

Преобразователи «Сапфир – 22ДД» имеют нелинейную по расходу характеристику, поэтому применяются в комплекте с БП, имеющими квадратор. В качестве ИП могут быть использованы все перечисленные типы приборов для ДМЭР.



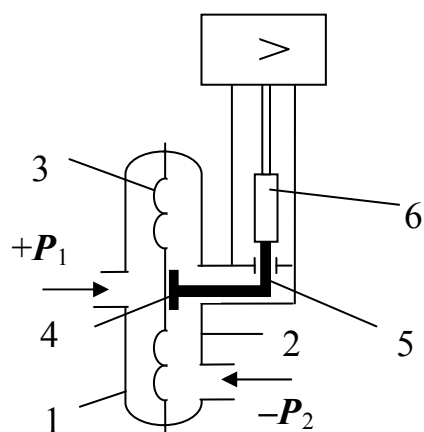
Сапфир –22ДД состоит из измерительного блока (ИБ) и электронного устройства 1.

Тензопреобразователь 2 мембранно – рычажного типа размещен внутри основания 3 в замкнутой полости 4, заполненной кремне - органической жидкостью и отделен от измеряемой среды металлическими гофрированными мембранами 5.

Мембраны 5 приварены к основанию 3 и соединены между собой штоком 6, который связан с концом рычага тензопреобразователя 2 с помощью тяги 7.

Разность давлений ($P_1 - P_2$) вызывает прогиб мембран 5 и, соответственно, изгиб мембраны тензопреобразователя 2 и изменение сопротивления тензорезисторов. Изменение сопротивлений тензорезисторов приводит к разбалансу мостовую схему электронного устройства, а, следовательно, к изменению выходного сигнала. Масса – 4 – 6,3 кг.

Технические и метрологические характеристики ПП типа «Метран -43 ДД» такие же, как и у «Сапфира –22ДД»



Между фланцем 1 и корпусом 2 крепится мембрана 3, к которой приварен жесткий центр 4. Жесткий центр с помощью тяги 5, соединен с рычагом тензопреобразователя 6. Перемещение рычага 6 вызывает деформацию мембраны тензопреобразователя, на которой расположены тензорезисторы. Деформация мембраны тензопреобразователя вызывает изменение сопротивления тензорезисторов, что приводит к возникновению электрического сигнала.

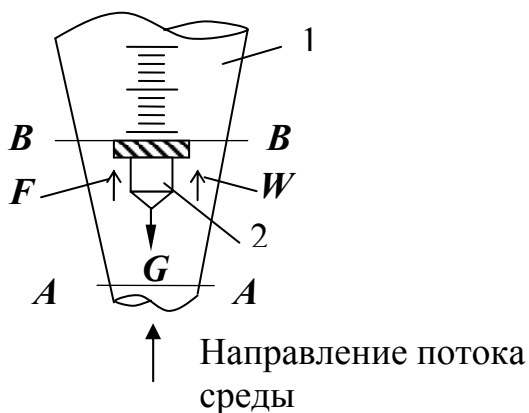
Электрический сигнал с измерительного блока поступает для обработки в электронный преобразователь 7. Масса датчика – 3 кг. Датчики имеют устройство, позволяющее перенастраивать их на любой из пределов измерений для данной модели, корректор нуля, корректор диапазона. Блок питания типа 22 БП – 36, БПС – 300 –2К, БПД – 40 –2К, БИК – 300 –2К, БПК – 40 –2К и т.п.

Расходомеры постоянного перепада

К приборам постоянного перепада давления относятся ротаметры, поршневые и поплавковые расходомеры.

Ротаметры

Ротаметры используются в промышленных и лабораторных установках для измерения небольших объемных расходов жидкостей (верхние пределы ротаметров по воде находятся в пределах от 0,04 до 16 м³/ч) или газов (верхние пределы измерения ротаметров по воздуху находятся в пределах от 0,063 до 40 м³/ч) в вертикальных трубопроводах диаметром от 4 до 100 мм.



В простейшем случае ротаметр представляет собой вертикальную коническую (расходящуюся вверх) стеклянную трубку 1, внутри которой располагается поплавок 2.

Поплавки могут иметь различную форму. Одной из форм является цилиндрическая, с нижней конической частью и верхним бортиком с вырезанными на нем косыми канавками.

Контролируемая среда при протекании через эти канавки обеспечивает вращение поплавка, при этом он центрируется по оси трубки и устраняется трение его о стенки.

Между бортиком поплавка и стенкой трубки образуется кольцевой зазор площадью f_k , при прохождении через который поток жидкости сужается и, таким образом, возникает разность между давлением P_1 в сечении AA до начала сужения и давлением P_2 в самом узком сечении BB кольцевого потока. С подъемом поплавка площадь f_k увеличивается, что в случае неизменного расхода приведет к уменьшению разности $P_1 - P_2$.

Принцип действия ротаметра основан на уравнивании при любом расходе силы тяжести поплавка силами, действующими на него со стороны движущейся среды – жидкости или газа. При этом вертикальное положение поплавка будет однозначно связано с расходом.

Рассмотрим подробнее силы, действующие на поплавок, имеющий объем V , площадь наибольшего сечения f , среднюю плотность ρ_n . Сверху в низ на поплавок действует сила тяжести

$$G = V \cdot \rho_n \cdot g$$

Снизу вверх на поплавок действует:

1) сила, обусловленная разностью статических давлений $P_1 - P_2$, возникающая вследствие ускорения потока в кольцевом зазоре между стенкой и поплавком

$$F = (P_1 - P_2) f_K,$$

где f_K – площадь зазора в сечении BB .

2) динамический напор

$$W = \varphi \frac{\rho v^2}{2} f,$$

где φ – коэффициент сопротивления поплавка, зависящий от его формы;

ρ – плотность измеряемой среды;

v – скорость измеряемой среды в сечении AA ;

f – площадь наибольшего сечения поплавка.

3) сила трения потока о боковую поверхность поплавка

$$N = k(v_K)^n f_\delta,$$

где k – коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса и степени шероховатости поплавка;

v_K – средняя скорость потока в кольцевом зазоре;

n – показатель степени, зависящий от скорости потока;

f_δ – площадь боковой поверхности поплавка.

Поплавок будет неподвижно висеть в потоке жидкости или газа, если будет соблюдаться равенство сил, действующих на него сверху и снизу

$$G = (P_1 - P_2) f_K + W + N$$

Отсюда получим уравнение

$$(P_1 - P_2) = (G - W - N) / f_K$$

Если пренебречь силами W и N , ввиду их малости, то уравнение примет следующий вид

$$P_1 - P_2 = G / f_K,$$

т.е. перепад давления на поплавке оказывается независимым от расхода. Поэтому ротаметры относятся к группе расходомеров постоянного перепада.

Действие ротаметра можно пояснить, используя последнее уравнение.

Предположим, что при исходном расходе Q_0 поплавков занимает исходное положение, характеризующееся площадью кольцевого зазора f_{k_1} . При этом на поплавок действует перепад $P_1 - P_2$ при котором выполняется это уравнение. При увеличении расхода в первый момент положение поплавка и f_k неизменны, в силу чего $P_1 - P_2$ начнет увеличиваться. При этом нарушается равенство, т.е. $P_1 - P_2 > G / f_{k_1}$ и поплавок начнет подниматься вверх. При этом f_k будет увеличиваться, что приведет к уменьшению $(P_1 - P_2)_2$. Уменьшение будет происходить до тех пор, пока вновь не установится равенство

$$(P_1 - P_2)_2 = G / f_{k_2}$$

Очевидно, что любому расходу будет соответствовать определенная площадь f_k кольцевого зазора, т.е. определенное положение поплавка.

Уравнение, связывающее Q_0 и f_k , записывается в виде аналогичном уравнению расхода для расходомеров переменного перепада давления

$$Q_0 = \alpha \cdot f_k \cdot \sqrt{2gV(\rho_{II} - \rho_1) / (\rho f)},$$

где ρ – плотность измеряемой среды;

V – объем поплавка;

α – коэффициент расхода;

f – площадь наибольшего сечения поплавка.

Из уравнения следует, что при $\alpha = \text{const}$ существует линейная зависимость между Q_0 и f_k , а также следует, что положение поплавка зависит от плотности контролируемой среды ρ_1 . Следовательно, градуировка ротаметра должна производиться с ее учетом.

Ротаметры, как уже отмечалось, делятся на 2 группы:

- 1) для жидкостей, которые градуируются по воде;
- 2) для газов, которые градуируются по воздуху.

Если такие ротаметры используются для измерения расхода других сред, то в их показания необходимо вводить поправку k . Если вязкости измеряемой и градуировочной среды близки, то поправочный коэффициент k рассчитывают по формуле и показания ротаметра умножаются на k .

$$k = \sqrt{\frac{\rho_{sp}(\rho_{II} - \rho)}{\rho(\rho_{II} - \rho_{sp})}},$$

где ρ_{sp} и ρ – градуировочная и действительная плотность среды;

ρ_{II} – средняя плотность поплавка.

Обычно для газов $\rho \ll \rho_{II}$, тогда

$$k = \sqrt{\rho_{2p} / \rho}.$$

Класс точности ротаметра $k=2,5$. Погрешность измерения расхода ротаметром может быть определена через погрешность величин входящих в уравнение расхода по аналогичной формуле, что и для расходомеров переменного $\Delta\rho$. Эта погрешность может быть значительна, что и обуславливает низкий класс точности. Диапазон измерения равен $(0,2 - 1) Q_{вн}$. Погрешность измерения может быть уменьшена путем индивидуальной градуировки.

Ротаметры со стеклянной конусной трубкой применяются для измерения расхода прозрачных жидкостей и газов, находящихся под давлением не более 0,6 МПа (6 кгс/см²). Шкала наносится непосредственно на трубку, отсчет производится по верхней кромке поплавка.

Для измерения расхода сред с большим избыточным давлением 6,4 МПа (64 кгс/см²) используются ротаметры с металлической конической трубкой. Обычно такие ротаметры снабжаются ДТП и работают в комплекте с вторичным прибором ($k=2,5$).

Материал поплавков: сталь, алюминий, бронза, эбонит, пластмассы – не должен подвергаться коррозии и вступать в химические реакции с контролируемой средой.

Достоинства ротаметров:

- 1) простота устройства;
- 2) возможность измерения малых расходов и на трубопроводах малых диаметров;
- 3) практически равномерная шкала.

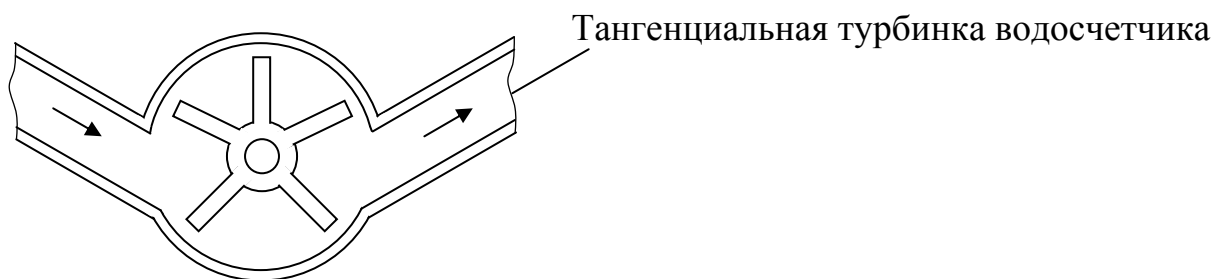
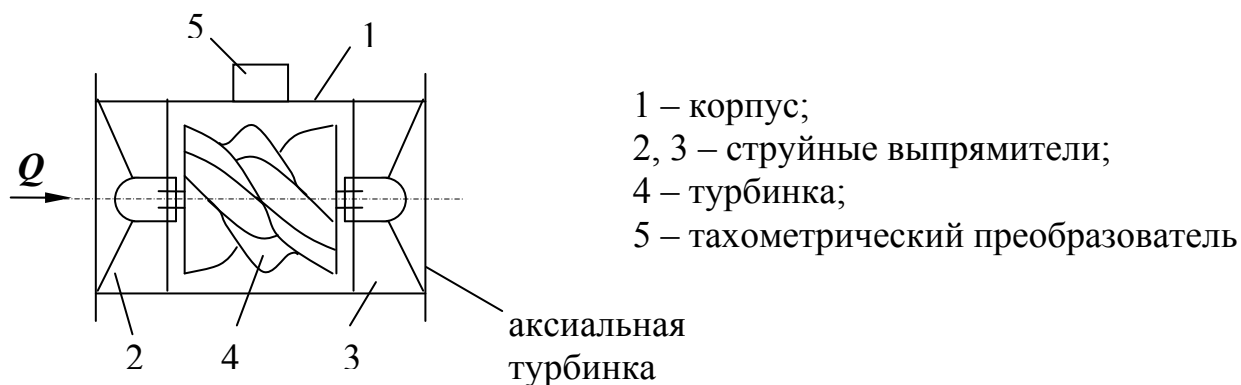
Недостатки ротаметров:

- 1) необходимость установки только на вертикальных трубопроводах, когда среда течет снизу вверх;
- 2) непригодность для измерения расхода сред с высокими давлениями и температурами.

Тахометрические расходомеры

К ним относятся: турбинные, шариковые и камерные. Тахометрические преобразователи расхода могут использоваться как в счетчиках количества, так и в расходомерах.

Турбинные расходомеры применяются для измерения расхода жидкостей обладающих смазывающей способностью (нефтепродукты), а также для горячей воды.



В турбинных расходомерах частота вращения турбинки, пропорциональная объемному расходу. Частота с помощью преобразователя 5 преобразуется в частоту выходного напряжения и затем с помощью специальной схемы – в аналоговый выходной сигнал.

В турбинных преобразователях частота вращения турбинки пропорциональна Q_0 . Преобразователь 5 представляет собой индукционную катушку. При пересечении магнитного поля катушки лопастями ферромагнитной турбинки в катушке наводится пикообразный пульсирующий ток. Частота пульсаций наведенного тока пропорциональна угловой скорости вращения турбинки, а следовательно, и измеряемому расходу.

Импульсы пульсирующего тока регистрируются отсчетной системой. Общее число импульсов, зарегистрированных этой системой за время τ , характеризует суммарное количество вещества, протекающего по трубопроводу за это время. Число импульсов, зарегистрированных системой за единицу времени, характеризует расход измеряемого вещества.

Если предположить, что на турбинку не действует никаких моментов, препятствующих ее вращению, то зависимость между угловой скоростью вращения турбинки ω и расходом Q_0 определялась бы уравнением

$$\omega = A Q_0, \text{ где } A = a/b.$$

a и b – коэффициенты, определяемые конструктивными размерами турбинки и зависящие от Re .

В действительности на турбинку действуют моменты сил гидравлического трения жидкости, момент сил трения в опорах и ряд других. Действие этих моментов будет характеризоваться зоной нечувствительности прибора, т.е. тем наименьшим расходом Q_H , который необходим для того, чтобы продолжить моменты сопротивления и сдвинуть турбинку с места или изменить ее установившуюся скорость вращения.

С учетом сказанного формула приобретает вид

$$\omega = A(Q_0 - Q_H)$$

Как следует из этого уравнения, область постоянной линейной зависимости угловой скорости вращения турбинки ω от расхода определяется зоной постоянства коэффициента A и величины Q_H , которые в общем случае кроме конструктивных размеров турбинки зависят также от Re , структуры потока, расхода и вязкости измеряемой среды.

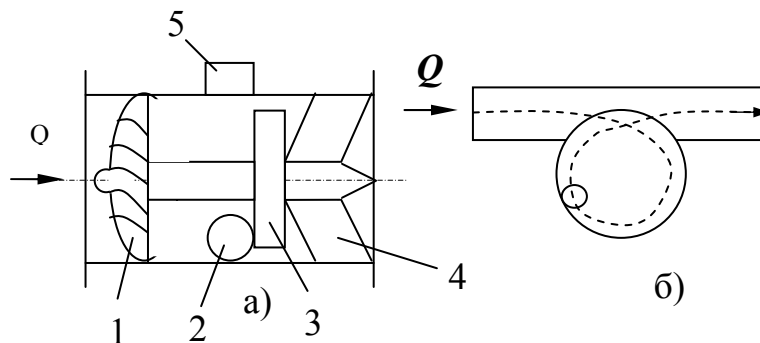
Значение Q_H при правильном проектировании и изготовлении турбинных датчиков может быть сведено к ничтожно малому, что и обеспечивает высокую чувствительность и большой диапазон измерений турбинных расходомеров.

Преобразователи расхода таких расходомеров изготавливаются с $D_y = 32 \div 200$ мм для $P_{\text{раб}} = 6,4$ МПа и $t = 4 \div 150$ °С, $Q_{\text{вп}} = 6,3 \div 240$ м³/ч, предел основной допускаемой погрешности $\pm 1\%$ в диапазоне $(0,1 \div 1) Q_{\text{вп}}$. Следует отметить, что турбинные расходомеры в настоящее время являются одними из наиболее точных.

Существует серийно выпускаемые расходомеры с основной погрешностью $\pm 0,5\%$.

Шариковые тахометрические расходомеры

Шариковыми называются тахометрические расходомеры, подвижным элементом которых является шарик, непрерывно движущийся в одной плоскости по внутренней поверхности корпуса под воздействием предварительно закрученного потока. Скорость движения шарика пропорциональна объемному расходу. Шар под действием центробежной силы прижимается к внутренней поверхности корпуса, а под действием осевой составляющей скорости потока к ограничительному кольцу, т.е. шару кроме сил вязкого трения жидкости, необходимо преодолевать силы трения о поверхность корпуса и ограничительного кольца.



1 - формирователь потока; 2 - шарик; 3 - кольцо;
4 - струевыпрямитель; 5 - преобразователь.

Устройство расходомера для измерения
а) больших расходов, б) малых расходов

Это вызывает отставание окружной скорости шара $v_{ш}$ от окружной скорости потока v , которое оценивается коэффициентом скольжения

$$S = (v - v_{ш}) / v.$$

Откуда

$$v_{ш} = v(1 - S).$$

Частота импульсов тахометрического преобразователя связана со скоростью шара соотношением

$$f = \frac{v_{ш}}{2\pi r},$$

где r – радиус вращения центра шара.

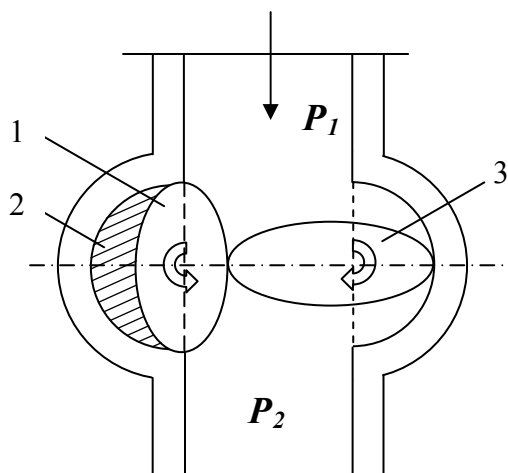
Учитывая, что $v = kQ_0$, где k – коэффициент пропорциональности, можно получить

$$f = kQ_0(1 - S) / (2\pi r).$$

Таким образом, для обеспечения однозначной зависимости между f и Q_0 надо иметь $S = \text{const}$. Это возможно лишь для сред $10^3 < Re < 10^5$, поэтому шариковые расходомеры проектируются для этого диапазона.

На АЭС используются шариковые расходомеры ШТОРМ – 32М с $Q_{вн} = 50 \text{ м}^3/\text{ч}$ и ШТОРМ – 8А с $Q_{вн} = 8 \text{ м}^3/\text{ч}$.

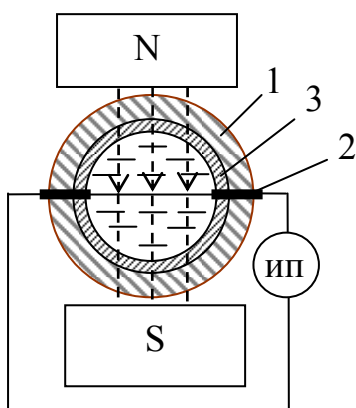
Камерными называются расходомеры и счетчики, имеющие один или несколько подвижных элементов, которые при движении отмеряют определенные объемы жидкости. Эти элементы движутся непрерывно со скоростью пропорциональной объемному расходу. В промышленности применяются в основном камерные счетчики. Точность их высокая: для жидкости 0,5-1% для газа 1-1,5%.



Под действием разности давлений $P_1 - P_2$ возникает вращающий момент, который вращает шестерню 3, при этом шестерня 1 – ведомая. Происходит поочередное заполнение и опорожнение измерительных камер 2. Посредством магнитной муфты движение от одной из шестерен передается на счетный механизм. Счетчики жидкости с овальными шестернями предназначены для жидкостей с вязкостью от $55 \cdot 10^{-6}$ до $3 \cdot 10^{-4}$ м²/с с $t = -40$ до $+120^{\circ}\text{C}$ и $P = 64$ кгс/см² для труб диаметром 100 мм погрешность 0,5%.

Электромагнитные расходомеры

Принцип действия их основан на законе электромагнитной индукции, в соответствии с которым в электропроводной жидкости, пересекающей магнитное поле, индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости движения жидкости.



Корпус 1 преобразователя, изготовленный из немагнитного материала и покрытый изнутри электрической изоляцией 2, расположен между полюсами постоянного магнита.

Через стенку корпуса по диаметру введены электроды 3, находящиеся в электрическом контакте с жидкостью. Силовые линии магнитного поля направлены \perp плоскости, проходящей через ось трубы и линию электродов.

В соответствии с законом электромагнитной индукции при асимметричном профиле скоростей в жидкости между электродами будет наводиться ЭДС

$$E = BDv,$$

где B – магнитная индукция;

D – длина жидкостного проводника равная диаметру трубопровода;

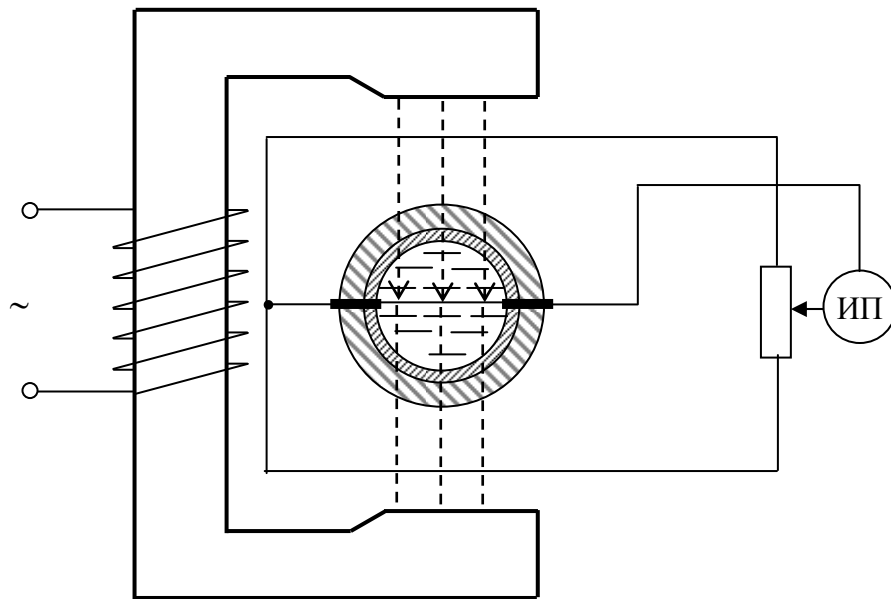
v – средняя скорость жидкости.

Учитывая, что

$$Q_0 = v\pi D^2/4 \text{ получим}$$

$$E = 4BQ_0 / (\pi D).$$

Из уравнения следует, что при $B = \text{const}$ E прямопропорциональна Q_0 .
Измерение наведенной ЭДС осуществляется измерительным прибором (ИП).
Чаще всего вместо постоянного магнита применяется электромагнит с переменным полем.



$$E = \frac{4B_{max} \sin(2\pi f\tau)}{\pi D} \cdot Q_0,$$

где B_{max} – амплитудное значение синусоидальной изменяющейся магнитной индукции;

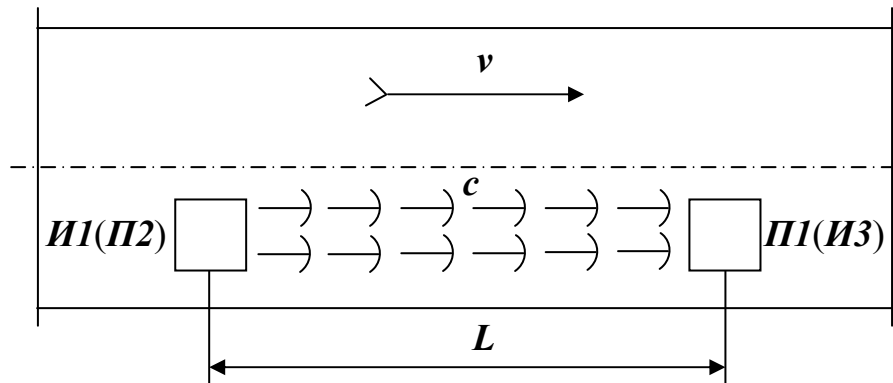
f – частота переменного тока;

τ – время.

Диапазон измерения электромагнитных расходомеров (0,01-1) $Q_{ВП}$, потеря давления отсутствует, длина прямого участка $l = 10D$, могут использо-

ваться для измерения расхода агрессивных, абразивных, вязких жидкостей и пульп. Наиболее точным является расходомер типа ИР-51 класса 1 для $D_y = 15 \div 1000$ мм и $Q_{ВП} = 0,32 \div 2500$ м³/ч. (ИР-61)

Ультразвуковые расходомеры



Звуковые колебания высокой частоты (20 кГц и выше), создаваемые электроакустическим вибратором (излучателем) **И1**, проходят по текущей через трубопровод среде и регистрируются приемником **П1**, отстоящим от излучателя на расстоянии **L**.

Если **v** скорость потока среды, а **c** – скорость звука в данной среде, то продолжительность распространения звуковой волны по направлению движения потока от излучателя **И1** до приемника **П1**

$$\tau_1 = \frac{L}{c+v}.$$

Продолжительность же распространения звуковой волны против движения потока от излучателя **И2** до приемника **П2**

$$\tau_2 = \frac{L}{c-v}.$$

Тогда разность $\tau_1 - \tau_2$, измеренная электронно – счетной схемой равна

$$\Delta\tau = \frac{2Lv}{c^2} \cdot \frac{1}{1-(v^2/c^2)}.$$

Приняв во внимание, что v^2/c^2 пренебрежимо мало по сравнению с 1 (например для жидкостей, у которых $c = 1000 - 1500$ м/с, а $v = 6 - 8$ м/с, $v^2/c^2 < 6 \cdot 10^{-5}$) и выразив скорость потока через расход, получим уравнение измерения расхода ультразвуковыми расходомерами

$$\Delta\tau = 2\varphi \frac{L}{F \cdot c^2} \cdot Q_0,$$

где F – площадь сечения потока,

φ – коэффициент, учитывающий распределение скоростей по сечению потока.

Существуют различные способы и различные измерительные схемы для определения $\Delta\tau$.

Достоинства ультразвуковых расходомеров:

- возможность бесконтактного измерения расхода любых сред (по способу, основанному на измерении смещения потоком ультразвуковой волны, направленной \perp к направлению движения среды);
- высокое быстродействие, позволяющее измерять пульсирующие расходы с частотой пульсаций до 10000 Гц.