

А.Г. ДИВИН, С.В. ПОНОМАРЕВ, Г.В. МОЗГОВА

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

Часть 2



ИЗДАТЕЛЬСТВО ФГБОУ ВПО «ТГТУ»

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Тамбовский государственный технический университет»

А.Г. ДИВИН, С.В. ПОНОМАРЕВ, Г.В. МОЗГОВА

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

Часть 2

*Допущено УМО по образованию
в области прикладной математики и управления качеством
в качестве учебного пособия для студентов высших
учебных заведений, обучающихся по специальности
220501 «Управление качеством» и направлению
221400 «Управление качеством»*



Тамбов
Издательство ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
2012

УДК 681.5.08(075.8)
ББК Ж107я73 + з221я73
Д443

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
компьютерного и математического моделирования
ФГБОУ ВПО «ТГУ им. Г.Р. Державина»
А.А. Арзамасцев

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой
«Теория машин, механизмов и детали машин» ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
В.М. Червяков

Дивин, А.Г.

Д443 Методы и средства измерений, испытаний и контроля :
учебное пособие. В 5 ч. / А.Г. Дивин, С.В. Пономарев, Г.В. Моз-
гова. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – Ч. 2. –
108 с. – 100 экз. – ISBN 978-5-8265-1102-2

Рассмотрены средства измерения деформаций, силовых воздействий и массы, средства измерения уровня жидкостей и сыпучих тел. Приведены средства измерения расхода жидкостей и газов. Имеется их классификация, информация о принципе действия и конструкции классических и современных измерительных средств. Отдельная глава посвящена основным видам средств измерения скорости, ускорения и параметров вибрации.

Предназначено для студентов вузов дневного и заочного отделений, обучающихся по специальности 220501 «Управление качеством» и направлению 221400 «Управление качеством».

УДК 681.5.08(075.8)
ББК Ж107я73 + з221я73

ISBN 978-5-8265-1102-2

© Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Тамбовский государственный технический университет» ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012

ВВЕДЕНИЕ

Знания о методах и средствах контроля характеристик продукции необходимы для специалистов в области стандартизации, сертификации и управления качеством, так как инструментальный контроль является наиболее целесообразным для получения объективной, полной и достоверной информации о параметрах исследуемого объекта.

Предлагаемое учебное пособие является второй частью методического комплекса по дисциплине «Методы и средства измерений, испытаний и контроля». Оно предназначено для студентов, магистрантов и аспирантов, специализирующихся в области проектирования, разработки и практического применения приборов при сертификационных испытаниях. В данной части методического комплекса рассмотрены основы измерения деформаций, силовых воздействий, уровня жидкостей и сыпучих веществ, а также параметров движения: скорости, ускорения, виброускорения. Перечисленные физические величины в большинстве случаев необходимо определять и поддерживать на заданном уровне при различного рода испытаниях продукции. Представленное учебное пособие поможет студентам понять важность измерения этих параметров и познакомит с наиболее распространёнными методами и средствами их определения.

1. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ, СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И МАССЫ

1.1. ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Тензорезисторный преобразователь (тензорезистор) в настоящее время наиболее часто применяется для измерения малых деформаций. Он представляет собой проводник (или полупроводник), изменяющий своё сопротивление при деформации сжатия–растяжения. При деформации проводника изменяются его длина l и площадь поперечного сечения S . Деформация кристаллической решётки материала тензорезистора приводит также к изменению его удельного сопротивления ρ . Эти изменения приводят к изменению сопротивления проводника

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Этим свойством обладают в большей или меньшей степени все проводники.

Важнейшей характеристикой тензорезистора является **коэффициент тензочувствительности**, который вычисляется по формуле

$$S_T = \frac{\delta_R}{\delta_l} = 1 + 2\mu + m,$$

где $\delta_R = \frac{\Delta R}{R}$ – относительное изменение сопротивления тензорезистора

при деформации; $\delta_l = \frac{\Delta l}{l}$ – относительная деформация тензорезистора;

μ – коэффициент Пуассона; m – относительное изменение удельного сопротивления, вызванное действием относительной деформации, равной единице.

Основным требованием к материалу тензопреобразователей является возможно большее значение коэффициента относительной чувствительности S_T . Это объясняется тем, что относительное изменение сопротивления δ_R у большинства тензорезисторов мало, не превышает $(5...7) \cdot 10^{-3}$. Нагрев преобразователя может вызвать изменение его сопротивления, соизмеримое с рабочим изменением, поэтому другое требование – возможно меньшее значение температурного коэффициента сопротивления материала. Это определяет температурную погрешность преобразователя. Третье требование – высокое удельное сопротивление материала, из которого изготавливается преобразователь, что необходимо для уменьшения его габаритных размеров. Для изготовления тензорезисторов часто применяют следующие материалы:

константан, нихром, манганин, никель, хромель, висмут, титаноалюминиевый сплав и полупроводниковые материалы (соединения германия, кремния и т.д.). Наилучшим отечественным материалом для изготовления проводниковых тензорезисторов, используемых при температурах ниже 180 °С, является константан.

Тензочувствительность константана лежит в пределах 2,0...2,1, а нелинейность функции преобразования не превышает 1%.

В настоящее время наиболее широко применяют проволоочные, фольговые, плёночные и полупроводниковые тензорезисторы.

Проволоочный тензорезистор имеет устройство, показанное на рис. 1.1. Его решётка выполнена из зигзагообразно уложенной проволоки 1 диаметром 20...50 мкм, размещённой на бумажной или плёночной основе 2. Для предохранения от разрыва при деформации, проволока имеет петли 4.

Подключение в измерительную схему осуществляется при помощи медных проводников 3 большего сечения, присоединённых к концам проволоки сваркой или пайкой. Для защиты от агрессивного воздействия окружающей среды константановая проволока покрывается или лаком или заклеивается бумагой.

Такой преобразователь приклеивается к испытываемой детали так, что он воспринимает деформацию поверхностного слоя испытываемой детали, вследствие чего изменяется сопротивление проволоки. Таким образом, естественной входной величиной является деформация поверхностного слоя испытываемой детали, а выходной – изменение сопротивления преобразователя, пропорциональное этой деформации. Измерительной базой преобразователя является длина детали, занимаемая проволокой. Наиболее часто используются преобразователи с базами 5...20 мм, обладающие сопротивлением 30...500 Ом.

По метрологическим и эксплуатационным характеристикам проволоочные преобразователи уступают фольговым.

Фольговые тензорезисторы представляют собой тонкую лаковую плёнку, на которую нанесена фольговая тензочувствительная решётка из константана толщиной 4...12 мкм. Решётка сверху покрыта лаком.

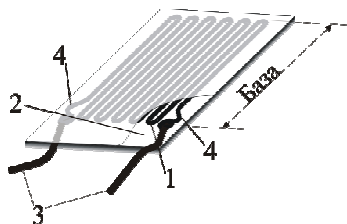


Рис. 1.1. Устройство проволоочного тензорезистора

Фольговые тензорезисторы нечувствительны к поперечной деформации вследствие малого сопротивления перемычек, соединяющих тензочувствительные элементы. При изготовлении таких преобразователей путём травления можно получить любой рисунок решётки, что является достоинством фольговых преобразователей. На рис. 1.2, а, б

представлены разновидности фольговых тензорезисторов. Большим преимуществом фольговых преобразователей является возможность увеличивать сечение их концов, что позволяет осуществить надёжное припаивание (приваривание) выводов, а также возможность изготовить фольговые преобразователи большего сечения, чем проволочные, что позволяет пропускать через преобразователи большие токи и, следовательно, делать приборы с тензопреобразователями более чувствительными.

При отношении ширины к толщине полосы, равном 10, допустимый ток в преобразователе из фольги в 1,4 раза больше, чем в преобразователе из проволоки того же сечения. Это объясняется тем, что фольговые тензорезисторы имеют большую поверхность для теплообмена с окружающей средой.

Фольговые, как и проволочные тензорезисторы, обычно имеют длину 5...20 мм, ширину 3...10 мм. Их номинальное сопротивление равно 50, 100, 200, 400 и 800 Ом. Параметры тензорезисторов общего назначения регламентирует ГОСТ 21616-76.

Полупроводниковые тензорезисторы представляют собой пластинку монокристалла кремния или германия длиной 5...10 мм, шириной 0,2...0,8 мм, выращенную на тонкой мембране из диэлектрика (например, сапфира). К торцам пластинки приварены выводные проводники.

Свойства полупроводниковых и металлических преобразователей сильно различаются. Чувствительность полупроводниковых преобразователей может быть как положительной, так и отрицательной и лежит в пределах $S_T = 55...130$. Как сопротивление, так и чувствительность, сильно зависят от температуры. Недостатком является также большой разброс параметров и характеристик.

Тензорезисторы применяются главным образом для преобразования деформации деталей под нагрузкой в изменение сопротивления. Для этого они приклеиваются к поверхностям этих деталей (рис. 1.3) и испытывают одинаковые с ними деформации.

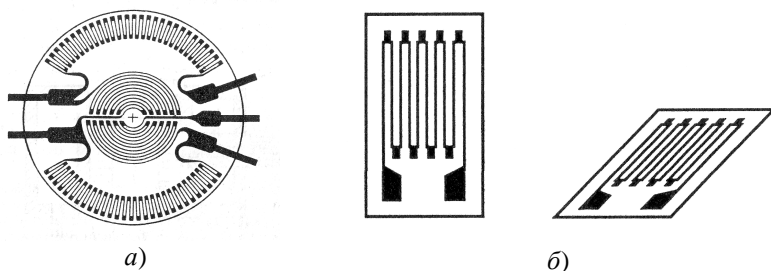


Рис. 1.2. Фольговые тензорезисторы

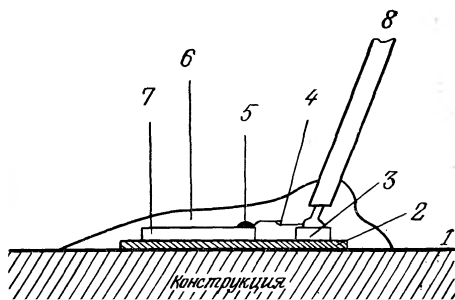


Рис. 1.3. Измерение деформации конструкции при помощи тензорезистора:

- 1 – поверхность объекта контроля; 2 – клей; 3 – контакт; 4 – провод;
 5 – спайка; 6 – защитный слой; 7 – тензорезисторный преобразователь;
 8 – кабель

Клей, с помощью которого приклеивают тензодатчик на образец, должен обладать прочностью, линейной упругостью и стабильностью в течение длительного периода времени.

Комбинация датчика – его несущая основа и клей требуют самого серьезного внимания. Необходимо применять апробированные клеи и соблюдать процедуры нанесения и сушки.

В качестве клея наиболее широко используется метил-2-цианоакриад, эпоксидная смола, полиимид, БФ-2 и др.

Температурная погрешность проводниковых тензорезисторов в основном имеет аддитивный характер. Для её компенсации часто используются дифференциальные схемы. Для этого тензорезисторы наклеиваются с разных сторон детали вдоль направления деформации, так, чтобы один из них растягивался, а другой – сжимался (рис. 1.4). В этом случае температурные условия и температурные изменения сопротивлений тензорезисторов одинаковы. При включении таких тензорезисторов в смежные плечи моста, температурная погрешность уменьшается. Переменный резистор R_5 мостовой измерительной схемы, показанной на рис. 1.4, служит для балансировки измерительного моста при отсутствии деформации объекта контроля. Плечи моста R_1 и R_2 образованы манганиновыми сопротивлениями, а плечи R_4 и R_3 представляют собой тензорезисторы, наклеенные на поверхности объекта таким образом, чтобы при деформации их сопротивление изменялось противоположным образом, что вызывает увеличение напряжения разбаланса мостовой схемы, измеряемым вторичным прибором ВП. Выходное напряжение тензорезисторного моста не превышает 10...20 мВ. Для дальнейшего преобразования такое напряжение без усиления использовать трудно. Поэтому в тензорезисторных приборах обычно используются усилители.

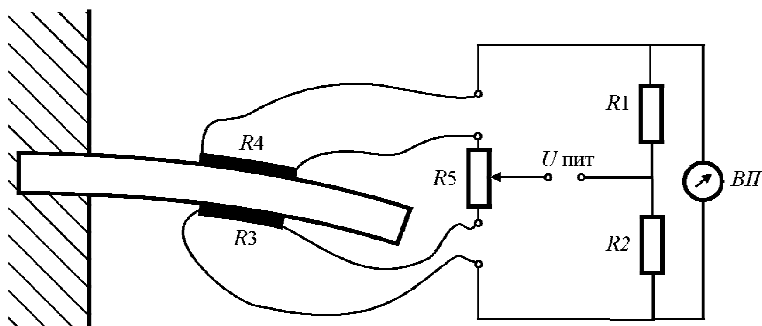


Рис. 1.4. Измерение деформации при помощи тензорезисторов

Измерение крутящих моментов

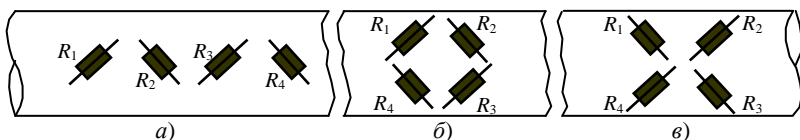


Рис. 1.5. Схемы наклейки тензорезисторов для измерения крутящего момента

Крутящие моменты валов машин и агрегатов также измеряют при помощи тензорезисторов (ОСТ 70.2.3–73). При этом тензорезисторы наклеивают на вал по линии действия напряжения кручения.

Наибольшие напряжения кручения при передаче момента валом отмечаются в его сечении, расположенном под углом 45° к образующей. В направлениях параллельных и перпендикулярных образующей вала, действует только деформация сдвига (рис. 1.5).

При измерении крутящих моментов почти не используются схемы с одним и двумя тензорезисторами, а применяются мостовые цепи с четырьмя резисторами. Такие схемы (рис. 1.5) позволяют получить на выходе моста мощный сигнал, исключить влияние изгиба вала и деформаций сдвига. Кроме того, мостовые цепи обеспечивают почти полную термокомпенсацию тензорезисторов.

1.2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СИЛЫ НА ОСНОВЕ УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Для измерения сил часто применяют методы непосредственной оценки, основанные на формировании противодействующих усилий при помощи специальных упругих конструктивных элементов: упру-

гих стержней, колец, скоб (в том числе пружин и тел с упругой деформацией) или использовании силы тяжести. В силоизмерительных устройствах компенсационного принципа действия также используют упругие элементы в сочетании с электрическими преобразователями перемещений.

Датчик со *стержневым упругим элементом* состоит из цилиндрического упругого элемента (рис. 1.6, а), на наружной поверхности которого установлены тензорезисторы и компенсационные сопротивления.

Достоинство стержневых упругих элементов заключается в простоте изготовления. Для таких элементов достаточно легко достигаются высокие классы точности выполнения геометрических размеров, чистоты обработки поверхностей. Кроме того, стержневой упругий элемент наиболее подходит для построения датчиков на высокие пределы измерения при ограниченной массе и габаритных размерах.

Одним из недостатков такого упругого элемента является малая величина перемещения, поэтому их применяют только в совокупности с тензорезисторными преобразователями (рис. 1.7), для которых величина возникающей деформации оказывается вполне приемлемой. Другой существенный недостаток стержневых упругих элементов – ограниченность чувствительности. Для увеличения чувствительности стержень выполняют полым, в виде цилиндра (рис. 1.6, б).

Это, кроме увеличения чувствительности, позволяет увеличивать площадь под установку тензорезисторов и даёт возможность уменьшить габаритные размеры и массу датчика.

Но уменьшение толщины стенки и диаметра цилиндра ограничено практическими возможностями его изготовления. Кроме того, жёсткость такого тонкостенного цилиндра делается соизмеримой с жёсткостью наклеиваемого тензорезистора, которая образуется за счёт клеевого слоя, изоляционной прокладки и является величиной нестабильной. Поэтому такие упругие элементы применяют в датчиках с пределами измерений более 500 Н.

В конструкции датчика силы с *кольцевым упругим элементом* вместо стержня установлено кольцо с двумя жёсткими участками вдоль вертикального диаметра, т.е. вдоль направления действия силы. Тензорезисторы приклеены на внутренней и наружной поверхности кольца, на линии горизонтального диаметра (рис. 1.8).

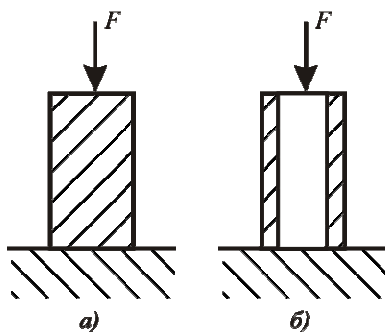


Рис. 1.6. Упругие стержни

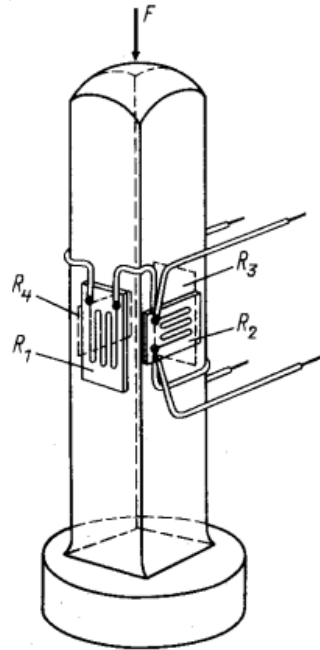


Рис. 1.7. Стержневой чувствительный элемент для измерения силы:
 R_1, R_3 – тензорезисторы, установленные в направлении действия силы; R_2, R_4 – тензорезисторы в направлении, перпендикулярном действию силы

Такие упругие элементы по сравнению со стержневыми имеют ряд преимуществ.

Во-первых, перемещение подвижной части упругого элемента существенно больше, чем у стержня. Это позволяет применять ёмкостные, индуктивные и другие преобразователи, где требуется значительное перемещение упругого элемента.

Во-вторых, кольцевые упругие элементы имеют более высокую чувствительность и поэтому их применяют для преобразования силы до 50 Н. Выполнение кольцевых элементов на высокие пределы измерения нецелесообразно, так как приводит к неоправданному увеличению размеров и массы датчика. Практически верхним пределом измерения силы кольцевых упругих элементов следует считать 5000 Н.

Шире возможности у кольцевого элемента и в части использования выходной величины. У кольца четыре зоны деформаций, в каждой из которых имеются одинаковые условия для установки тензорезисторов: деформации сжатия и растяжения, кривизна поверхностей для установки тензорезисторов примерно одинаковы.

Недостатком кольцевого элемента является то, что распределение напряжений в зонах деформаций неравномерное. Стремление получить более равномерное распределение напряжений привело к разработке кольца переменного сечения.

Кроме того, кольцевые упругие элементы менее технологичны, чем стержневые. При их изготовлении труднее обеспечивать высокие классы точности и чистоты обработки. Размеры и масса датчиков с кольцевыми элементами больше, чем со стержневыми. Однако в тех случаях, когда стержневой элемент не обеспечивает требуемой чувствительности или необходимо использовать в качестве выходной величины значительное перемещение, применение кольцевых упругих элементов оказывается весьма эффективным.

Датчик силы с балочным УЭ (рис. 1.9). Основным узлом этого датчика является чувствительный элемент, выполненный в виде балки равного сечения, с жёстко заделанным одним концом, с наклеенными на её грани тензорезисторами (см. рис. 1.4).

По технологичности изготовления такие датчики не уступают стержневым, позволяют получить большие перемещения, а деформации сжатия и растяжения у них строго одинаковы. Однако широкое использование их ограничено двумя причинами:

во-первых, при действии силы конец балки (см. рис. 1.9) перемещается по дуге окружности и точка приложения силы изменяет свои координаты, что вызывает дополнительные погрешности;

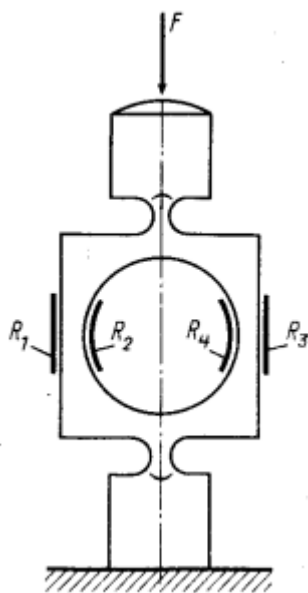


Рис. 1.8. Кольцевые упругие элементы

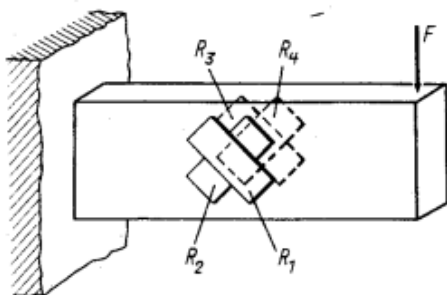


Рис. 1.9. Упругая балка

во-вторых, трудностями жёсткой заделки второго конца балки, преодоление которых приводит к существенному удорожанию датчика, увеличению массы и размеров. Распределение напряжений в балке постоянного сечения неравномерное. Для получения равномерного распределения напряжений применяют балку равного сопротивления. Однако при этом следует учитывать, что собственная частота балки сильно зависит от массы присоединённых к ней элементов. Поэтому балочные упругие элементы применяют в тех случаях, когда кольцевые элементы не обеспечивают заданной чувствительности, например, в датчиках силы с пределами измерения меньше 50 Н.

1.3. УГОЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ МЕХАНИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

Угольные датчики основаны на принципе изменения собственного электрического сопротивления под действием приложенных сил.

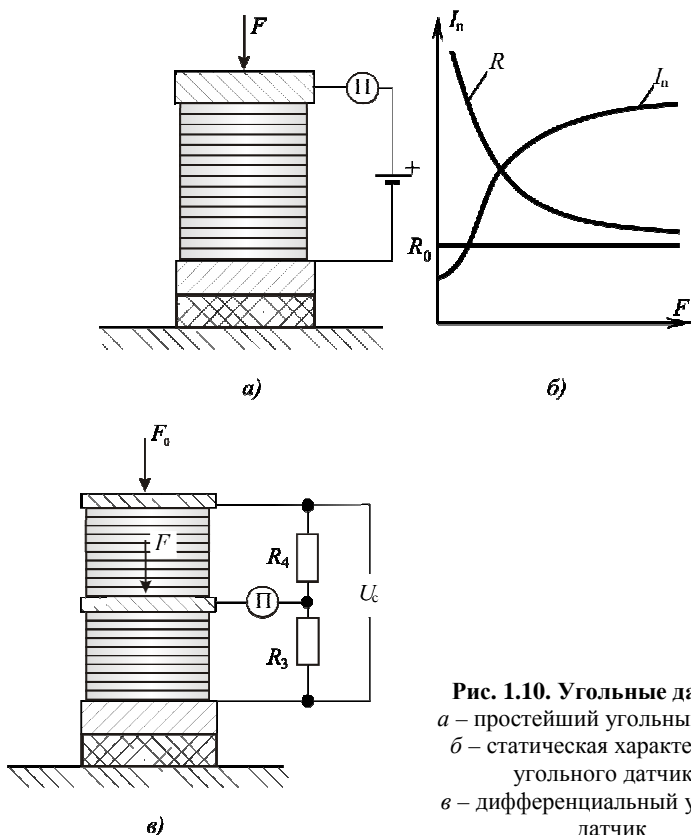


Рис. 1.10. Угольные датчики:
 а – простейший угольный датчик;
 б – статическая характеристика угольного датчика;
 в – дифференциальный угольный датчик

Простейший датчик этого типа (рис. 1.10, а) представляет собой угольный столб, набранный из графитовых дисков, которые расположены между контактными шайбами. Электрическое сопротивление угольного столба складывается из относительно небольшого собственного сопротивления дисков и основного сопротивления перехода между дисками, которое в значительной степени зависит от того, насколько плотно прилегают диски друг к другу, т.е. от усилия сжатия, действующего на диски.

На рисунке 1.10, б показаны кривые изменения сопротивления R (Ом) и выходного тока I_n (А) датчика в зависимости от усилия сжатия F . Сопротивление угольного датчика

$$R = R_0 + \frac{a}{F},$$

а ток во вторичном приборе, имеющем внутреннее сопротивление R_n ,

$$I_n = \frac{U_c}{R_n + R_0 + \frac{a}{F}},$$

где R_0 – постоянная величина, равная сопротивлению столба при $F \rightarrow \infty$, Ом, a – постоянный коэффициент, Ом·Н.

Чувствительность угольного датчика (Ом/Н)

$$K_D = \frac{dR}{dF} = -\frac{a}{F^2}.$$

Для повышения чувствительности таких датчиков применяют мостовые схемы включения угольных столбов (рис. 1.10, в). Входное усилие F вызывает в одном плече моста уменьшение сопротивления R_1 в результате сжатия, а во втором – увеличение R_2 . Такие датчики называют дифференциальными. Чтобы рабочая точка находилась на характеристике, близкой к линейной части, на угольный столб постоянно действует некоторое усилие сжатия F_0 .

Достоинство угольных датчиков – высокая чувствительность. Основные недостатки угольных датчиков: нестабильность сопротивления, наличие гистерезиса и нелинейность характеристики. Наибольшая нелинейность статической характеристики простейшего угольного датчика соответствует области малых усилий. У дифференциального датчика характеристика близка к нелинейной.

1.4. ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ ДИНАМИЧЕСКИХ УСИЛИЙ

Пьезоэлектрические преобразователи выполняются из материалов, в которых возможен пьезоэлектрический эффект, который может быть прямым и обратным.

Прямой пьезоэффект заключается в возникновении электрических зарядов на гранях пьезоэлектрика при воздействии на него механической силы, вызывающей механическое напряжение в материале. При устранении силы заряды исчезают.

Обратный пьезоэффект заключается в изменении геометрических размеров пьезоэлектрика при изменении в нём параметров электрического поля.

Чаще всего в качестве пьезоэлектрика применяют кварц, на примере которого и рассмотрим принцип действия пьезоэлектрического преобразователя.

В кристаллах кварца принято различать главные оси: электрическую X , механическую Y и оптическую Z (рис. 1.11).

Параллелепипед, вырезанный из кристалла кварца так, чтобы его грани были параллельны главным осям, обладает следующими свойствами:

- продольным пьезоэффектом при воздействии силы, направленной вдоль электрической оси X . На гранях bc , перпендикулярных этой оси, появляются электрические заряды;
- поперечным пьезоэффектом при воздействии силы F_y , направленной вдоль механической оси Y . Заряды появляются также на гранях bc ;
- отсутствием зарядов при приложении механической силы вдоль оптической оси Z .

Величина зарядов, возникающих на гранях кристалла bc под действием силы F_x , не зависит от геометрических размеров кристалла и равна

$$q = d_1 F_x,$$

где d_1 – постоянный коэффициент, называемый пьезоэлектрической постоянной.

Кроме кварца, ряд керамических диэлектриков, сегнетова соль и титанат бария также обладают пьезоэффектом, на основе которых изготавливают пьезоэлектрические первичные преобразователи и датчики (рис. 1.12). Они состоят из набора пластин, выполненных из материала, обладающего пьезоэффектом, и применяются для измерения динамических сил, моментов, вибраций, толчков и т.п.

В момент приложения механической силы F_x на поверхности появляются электрические заряды (рис. 1.12, $a, б$).

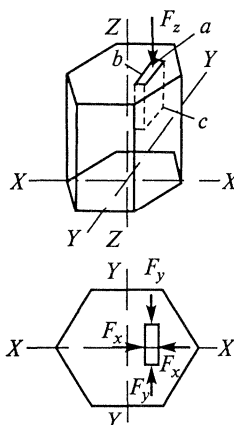


Рис. 1.11. Электрическая, механическая и оптическая оси кристалла кварца

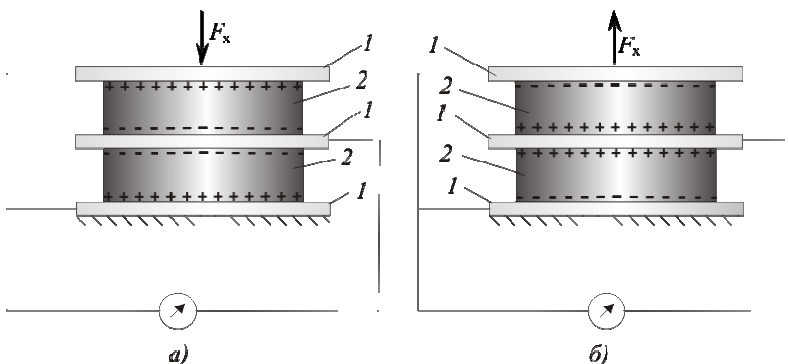


Рис. 1.12. Пьезоэлектрические преобразователи усилий

Суммарный заряд пропорционален значению действующей силы, а его знак показывает направление этой силы [сжатие (рис. 1.12, *а*) или растяжение (рис. 1.12, *б*)]. Напряжённость зарядов электрического поля измеряют специальными электронными устройствами.

Таким образом, напряжение U на обкладках датчика пропорционально значению действующей силы F_x

$$U = \frac{a_0 F_x}{C},$$

где a_0 – коэффициент пропорциональности, называемый пьезомодулем; C – суммарная ёмкость датчика и соединительных проводов.

Чувствительность рассматриваемого датчика

$$K_d = \frac{dU}{dF_x} = \frac{a_0}{C}.$$

Для повышения чувствительности датчика пластины соединяют последовательно, увеличивая, таким образом, суммарное напряжение.

Недостатки пьезоэлектрических датчиков (необходимость в применении усилителей, хрупкость пьезоматериала, возможность измерения только динамических сил) ограничивают сферу их применения.

1.5. МАГНИТОУПРУГИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ МЕХАНИЧЕСКИХ УСИЛИЙ И ДЕФОРМАЦИЙ

Магнитоупругий датчик – это измерительный преобразователь механических усилий или давления в электрический сигнал. Магнитоупругие преобразователи являются разновидностью электромагнитных преобразователей. Они основаны на явлении изменения магнитной

проницаемости μ ферромагнитных тел в зависимости от возникающих в них механических напряжений σ , связанных с воздействием на ферромагнитные тела механических сил P (растягивающих, сжимающих, изгибающих, скручивающих). Изменение магнитной проницаемости ферромагнитного сердечника вызывает изменение магнитного сопротивления сердечника R_m . Изменение же R_m ведёт к изменению индуктивности катушки L , находящейся на сердечнике. Таким образом, в магнитоупругом преобразователе имеем следующую цепь преобразований:

$$P \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_m \rightarrow L.$$

Магнитоупругие преобразователи могут иметь две обмотки (трансформаторного типа). Под действием силы вследствие изменения магнитной проницаемости изменяется взаимная индуктивность M между обмотками и наводимая ЭДС вторичной обмотки E . Цепь преобразования в этом случае имеет вид

$$P \rightarrow \sigma \rightarrow \mu \rightarrow R_m \rightarrow M \rightarrow E.$$

Эффект изменения магнитных свойств ферромагнитных материалов под влиянием механических деформаций называют **магнитоупругим эффектом**.

Существует и обратное явление: ферромагнитное тело, внесённое в магнитное поле, изменяет свои размеры, иначе говоря, внешнее магнитное поле вызывает механические деформации ферромагнитного тела. Изменение формы и размеров ферромагнитного тела при намагничивании носит название **магнитострикционного эффекта**. Под численным значением магнитострикции понимают относительное изменение $\frac{\Delta l}{l} = \lambda$ длины l стержня, обусловленное воздействием внешнего магнитного поля. Опыт показывает, что магнитострикционные и магнитоупругие явления не однозначны. Некоторые ферромагнитные тела имеют положительную магнитострикцию, т.е. увеличивают размеры в направлении магнитного поля, некоторые – отрицательную, т.е. тела уменьшают свои размеры в направлении магнитного поля. Величина магнитострикции, а также её знак зависят от материала магнитной цепи, его термообработки, температуры и напряжённости магнитного поля.

Характер зависимости магнитострикции $\lambda = \frac{\Delta l}{l}$ от напряжённости H намагничивающего поля для различных ферромагнитных материалов показан на рис. 1.13, а.

Магнитоупругий эффект также неоднозначен. Для одного и того же материала под воздействием механического напряжения магнитная

проницаемость в слабых полях может возрастать, в то время как в сильных полях падать. На рис. 1.13, б приведены кривые изменения индукции B в функции механической нагрузки при различных значениях напряжённости поля H для проволоки из мягкой стали.

Типы магнитоупругих преобразователей. Магнитоупругие преобразователи могут работать как переменные индуктивные сопротивления, величина которых определяется приложенным к сердечнику механическим усилием, и как трансформаторные преобразователи с переменной взаимной индуктивностью между обмотками.

На рисунке 1.14 представлены разновидности магнитоупругих преобразователей.

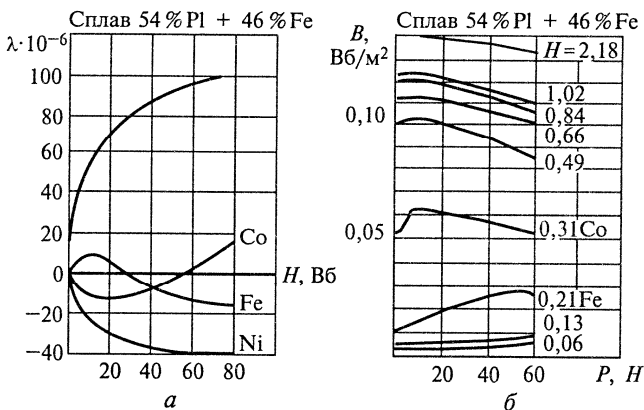


Рис. 1.13. Зависимости $\lambda = f(H)$ (а) и $B = f(P)$ (б)

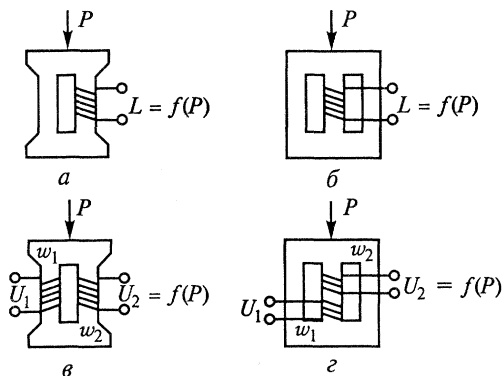


Рис. 1.14. Виды магнитоупругих преобразователей:

$a, б$ – индуктивного типа; $в, г$ – трансформаторного типа; $a, в$ – П-образным сердечником; $б, г$ – с Ш-образным сердечником

Магнитная цепь магнитоупругих преобразователей выполняется чаще всего из сплошного материала. Сердечник имеет щели для размещения обмотки. В разъёмных конструкциях готовую катушку надевают на сердечник. На рис. 1.15, *а* изображён тензометрический магнитоупругий преобразователь индуктивного типа, в котором в качестве сердечника 2 катушки 1 используется проволока из пермаллоя.

На рисунке 1.15, *б* изображена магнитная цепь преобразователя, выполненная из тонкого листа пермаллоя, наклеиваемого на испытываемую деталь.

У магнитоупругих преобразователей на переменном токе ЭДС во вторичной обмотке является функцией изменения взаимной индуктивности между катушками, обусловленной изменением магнитной проницаемости сердечника. Если первичную обмотку магнитоупругого преобразователя трансформаторного типа питать постоянным током, то он превращается в магнитоупругий преобразователь индукционного типа. В этом случае при измерении быстропеременных процессов во вторичной обмотке будет индуцироваться ЭДС, мгновенное значение которой определяется по формуле

$$e = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -cw_2 \frac{d\sigma}{dt},$$

где w_2 – число витков вторичной обмотки; c – коэффициент пропорциональности, зависящий от свойств материала и напряжённости намагничивающего поля; σ – напряжение в материале сердечника.

Чувствительность магнитоупругих преобразователей можно характеризовать, подобно тензорезисторам, коэффициентом тензочувствительности

$$S_e = \frac{\Delta\mu/\mu}{\Delta l/l} = \frac{\epsilon_\mu}{\epsilon_l},$$

в тех случаях, когда магнитоупругие преобразователи используются для измерения деформации Δl других деталей, т.е. когда естественной

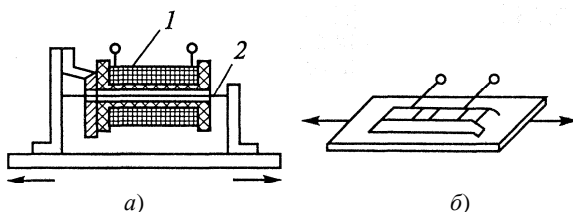


Рис. 1.15. Тензометрический магнитоупругий преобразователь индуктивного типа (*а*) и его магнитная цепь (*б*):

1 – катушка; *2* – сердечник

входной величиной является перемещение. Магнитоупругие преобразователи в качестве естественной величины воспринимают значение воздействующей на них силы. В этом случае относительной магнитоупругой чувствительностью материала, измеряемую в % на 1 Н/мм², называют относительное изменение магнитной проницаемости $\Delta\mu/\mu$, вызываемое единицей механического напряжения σ , т.е.

$$S_e = \frac{\Delta\mu/\mu}{\sigma}.$$

Теория ферромагнетизма дает теоретические соотношения, позволяющие обоснованно подойти к выбору материала магнитоупругого преобразователя.

Погрешности магнитоупругих преобразователей

Погрешности из-за нелинейности функции преобразования. Функция преобразования магнитоупругих преобразователей, как правило, нелинейна. Имеется ряд методов уменьшения этой нелинейности: при сокращении диапазона измеряемой силы, при соответствующем выборе магнитного режима преобразователя и т.д. Применение соответствующих мер позволяет уменьшить погрешность из-за нелинейности функции преобразования до 1,5...2%.

Магнитоупругая погрешность. Это погрешность невоспроизводимости магнитного состояния сердечника преобразователя при нагрузке и разгрузке. Её возникновение обусловлено магнитоупругим гистерезисом. Магнитоупругая погрешность уменьшается с увеличением напряжённости магнитного поля в сердечнике. Для получения возможно меньшей магнитоупругой погрешности сердечник следует изготавливать из ферромагнитных материалов с узкой петлёй магнитного гистерезисного цикла и высоким пределом упругости.

Погрешность от колебания напряжения. При изменении намагничивающего тока меняется как начальное значение магнитной проницаемости, так и величина магнитоупругого эффекта. Поэтому стабилизация напряжения питания необходима для всех типов датчиков. Иначе погрешность от колебания напряжения источника питания будет недопустимо большой.

Температурная погрешность. Колебания температуры преобразователя вызывают изменения: сопротивления R катушки постоянному току, начальной магнитной проницаемости и магнитоупругого эффекта, a , следовательно, и магнитоупругого эффекта. Эти изменения создают температурную погрешность. Но изменение активного сопротивления R мало сказывается на работе преобразователя, так как активное сопротивление значительно меньше полного сопротивления преобразователя.

Изменение магнитной проницаемости может иметь положительный и отрицательный знаки, в зависимости от материала преобразователя и рабочего значения напряжённости поля. Таким образом, в зависимости от выбранного материала сердечника и рабочего значения напряжённости поля, отдельные факторы при колебаниях температуры могут компенсировать друг друга в известных пределах. В случаях необходимости температурную погрешность можно скорректировать при помощи включения в соседнее плечо моста корректирующего преобразователя, идентичного с рабочим и находящегося в тех же температурных условиях, но не подвергающегося нагрузке.

Применение магнитоупругих преобразователей. Магнитоупругие преобразователи применяют:

- для измерения больших давлений (больше 10 Н/мм^2 , или 100 кг/см^2), так как они непосредственно воспринимают давление и не нуждаются в дополнительных преобразователях;
- для измерения силы. В этом случае предел измерения прибора определяется площадью магнитоупругого преобразователя. Данные преобразователи деформируются под действием силы очень незначительно. Так, при $l = 50 \text{ мм}$, $\Delta l < 10 \text{ мкм}$. Они имеют высокую жёсткость и собственную частоту до $20 \dots 50 \text{ кГц}$. Допустимые напряжения в материале магнитоупругого преобразователя не должны превышать 40 Н/мм^2 .

Рассмотрим принцип использования магнитоупругих преобразователей для измерения различных неэлектрических величин.

Измерение крутящего момента. В качестве примера использования магнитоупругих преобразователей на рис. 1.16 приведена конструкция датчика магнитоупругого торсиометра, применяемого для измерения крутящего момента на буровом инструменте.

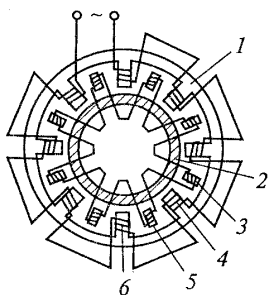


Рис. 1.16. Устройство датчика магнитоупругого торсиометра:

- 1 – статор; 2 – рабочий вал;
3 – измерительные катушки;
4 – полюсы; 5 – сердечник;
6 – намагничивающие катушки

Магнитоупругим элементом является участок рабочего вала 2, выполненного из ферромагнитного материала. Этот участок вала охвачен кольцевым статором 1. Статор имеет внутренние радиально расположенные выступы (полюсы) 4 из листовой трансформаторной стали, на которые намотаны намагничивающие катушки 6, питаемые переменным током.

Катушки соединены последовательно так, чтобы полюса чере-

довались. При отсутствии крутящего момента направление магнитного потока между полюсами перпендикулярно образующей вала (линия 2–2 на рис. 1.17). Измерительные катушки 3 преобразователя (рис. 1.16) имеют сердечник 5 П-образной формы из трансформаторной стали. Их оси расположены вдоль образующей вала. Катушки соединены последовательно. При отсутствии крутящего момента концы сердечника 5 расположены на одной и той же относительной магнитной эквипотенциальной линии 0,5 и, следовательно, разности магнитного потенциала между ними нет. При действии крутящего момента изменится магнитная проницаемость μ , материала вала, причём в направлениях, в которых вал испытывает деформацию сжатия, μ будет уменьшаться, а в направлениях деформации растяжения – увеличиваться.

Вследствие возникшей магнитной анизотропии изменится картина поля между полюсами намагничивающих катушек, т.е. полюса 2–2 сердечника измерительной катушки уже не будут находиться на одной эквипотенциальной линии и через сердечник пойдёт часть магнитного потока. При изменении знака момента картина поля изменится на обратную и на 180° изменится фаза потока, а, следовательно, и фаза выходного напряжения, индуцированного в катушке.

Магнитоупругий динамометр. Это прибор для измерения сосредоточенных сил. На рис. 1.18 представлена измерительная цепь магнитоупругого динамометра, где Z_x – сопротивление рабочего преобразователя, а Z_N – сопротивление ненагруженного (нерабочего) преобразователя. В исходном состоянии ($Z_x = Z_N$) измерительная цепь уравновешена, и ток через указатель равен нулю. При $Z_x \neq Z_N$ через указатель протекает ток. Шкала указателя может быть проградуирована в единицах измеряемой силы.

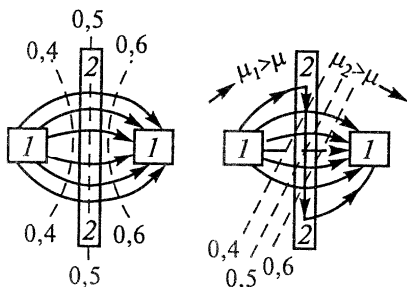


Рис. 1.17. Картина поля между полюсами 1–1, 2–2 намагничивающих катушек 1–1, 2–2

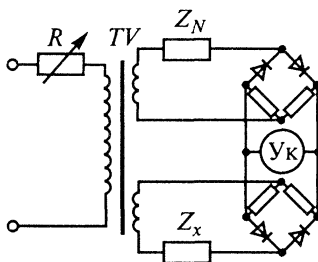


Рис. 1.18. Измерительная цепь магнитоупругого динамометра

Частота собственных колебаний преобразователя достигает нескольких десятков тысяч герц, что даст возможность при соответствующем выборе частоты источника питания измерять динамические силы до частот порядка 10 кГц.

1.6. ВИБРОЧАСТОТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ СИЛЫ

Чувствительным элементом таких датчиков является упругий элемент *1* (рис. 1.19), обладающий упругой деформацией. Это может быть упругая балка, упругое кольцо и др. Измеряемое усилие F_x преобразуется в изменение Δl длины колеблющейся ферромагнитной струны *2*, что вызывает, в свою очередь, соответствующее изменение частоты собственных колебаний этой струны. Колебания струны, поддерживаемые возбуждающим электромагнитом *3*, первоначально возникают под воздействием короткого импульса тока, посылаемого в струну, воспринимаются затем индуктивным преобразователем *4* и преобразуются в соответствующие колебания электрического сигнала, частота которых измеряется известными методами (например, подсчётом числа периодов за единицу времени).

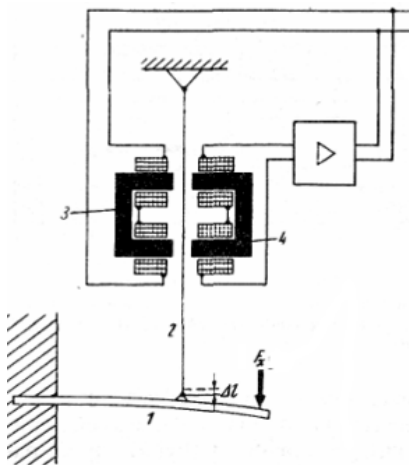


Рис. 1.19. Виброчастотный преобразователь силы

1.7. ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛИ СИЛЫ

Гидравлический измеритель механической силы F – **месдоза**, основан на преобразовании усилия F в давление $P = x_a$, причем $F = PS$, где S – площадь поверхности поршня *1* (рис. 1.20), соприкасающейся с

гидравлической жидкостью 2. Значение измеряемой силы считывают по шкале манометра 3.

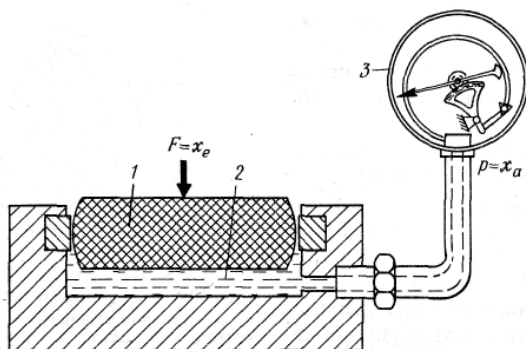


Рис. 1.20. Гидравлические измерители силы

Такие устройства позволяют измерять силы от 0,2 кН до 20 МН.

1.8. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

1.8.1. Классификация приборов для измерения давления

Давлением называется равномерно распределённая сила, действующая перпендикулярно на единицу площади. Оно может быть атмосферным (давление околоземной атмосферы), избыточным (превышающим атмосферное) и абсолютным (сумма атмосферного и избыточного). Абсолютное давление ниже атмосферного называется разреженным, а глубокое разрежение – **вакуум**.

При определении величины давления принято различать давление абсолютное, атмосферное, избыточное и вакуумметрическое.

Абсолютное давление (p_a) – это давление внутри какой-либо системы, под которым находится газ, пар или жидкость, отсчитываемое от абсолютного нуля.

Атмосферное давление (p_b) создается массой воздушного столба земной атмосферы. Оно имеет переменную величину, зависящую от высоты местности над уровнем моря, географической широты и метеорологических условий.

Избыточное давление определяется разностью между абсолютным давлением (p_a) и атмосферным давлением (p_b)

$$P_{\text{изб}} = p_a - p_b.$$

Под **вакуумом** (разрежением) понимают такое состояние газа, при котором его давление меньше атмосферного. Количественно вакуумметрическое давление определяется разностью между атмосферным давлением и абсолютным давлением внутри вакуумной системы

$$P_{\text{вак}} = p_{\text{в}} - p_{\text{а}}$$

Для измерения средних и высоких давлений применяются кратные единицы: килопаскаль (кПа), мегапаскаль (МПа) и др.

При измерении давления в движущихся средах под понятием давления понимают статическое и динамическое давление.

Статическое давление – это давление, зависящее от запаса потенциальной энергии газовой или жидкостной среды; определяется статическим напором. Оно может быть избыточным или вакуумметрическим, в частном случае может быть равно атмосферному.

Динамическое давление – это давление, обусловленное скоростью движения потока газа или жидкости. Определяется оно через скоростной (динамический) напор по следующей формуле:

$$P_{\text{д}} = \rho \frac{v^2}{2},$$

где $p_{\text{д}}$ – динамическое давление; ρ – плотность движущегося вещества; v – скорость движущегося потока.

Полное давление $p_{\text{п}}$ движущейся среды складывается из статического $p_{\text{ст}}$ и динамического $p_{\text{д}}$ давлений

$$P_{\text{п}} = p_{\text{ст}} + p_{\text{д}}$$

Приборы контроля давления классифицируются в зависимости от метода измерения, используемого в них, а также по характеру измеряемой величины.

1.8.2. Методы и средства измерения и контроля давления

Жидкостные средства измерения давления. Действие жидкостных средств измерений основано на гидростатическом принципе, при котором измеряемое давление уравнивается давлением столба затворной (рабочей) жидкости. Разница уровней в зависимости от плотности жидкости является мерой давления.

По методу измерения, определяющему принцип действия, эти приборы подразделяются на следующие группы:

- *жидкостные*, в которых измерение давления происходит путём уравнивания его столбом жидкости, высота которого определяет величину давления;
- *пружинные* (деформационные), в которых значение давления измеряется путём определения меры деформации упругих элементов;

- *грузопоршневые*, основанные на уравнивании сил, создаваемых с одной стороны измеряемым давлением, а с другой стороны калиброванными грузами действующими на поршень, помещённый в цилиндр;

- *электрические*, в которых измерение давления осуществляется путём преобразования его значения в электрическую величину, и путём замера электрических свойств материала, зависящих от величины давления.

По виду измеряемого давления приборы подразделяют на следующие:

- *манометры*, предназначенные для измерения избыточного давления;

- *вакуумметры*, служащие для измерения разрежения (вакуума);

- *мановакуумметры*, измеряющие избыточное давление и вакуум;

- *напоромеры*, используемые для измерения малых избыточных давлений;

- *тягомеры*, применяемые для измерения малых разрежений;

- *тягонапоромеры*, предназначенные для измерения малых давлений и разрежений;

- *дифференциальные манометры (дифманометры)*, с помощью которых измеряют разность давлений, ни одно из которых не равно атмосферному;

- *барометры*, используемые для измерения барометрического давления.

Простейшим прибором для измерения давления или разности давлений является двухтрубный (или U-образный) манометр (рис. 1.21, а), представляющий собой согнутую стеклянную трубку, заполненную рабочей жидкостью (ртутью или водой) и прикрепленную к панели со шкалой. Один конец трубки соединяется с атмосферой, а другой подключается к объекту, где изменяется давление. Его значение определяется из выражения

$$p = \rho gh ,$$

где p – измеряемое давление, Па; h – разность уровней жидкости, м; ρ – плотность жидкости, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с².

Верхний предел измерения двухтрубных манометров составляет 1...10 кПа при приведённой погрешности измерения 0,2...2%. Точность измерения давления этим средством будет определяться точностью отсчёта величины h , точностью определения плотности рабочей жидкости ρ и не зависит от сечения трубки.

Более удобным средством измерения давления является однотрубный (чашечный) манометр (рис. 1.21, б), в котором одна из трубок заме-

нена сосудом, диаметр его, как правило, в 20 раз больше диаметра трубки. Принцип действия манометра аналогичен рассмотренному выше, однако давление или разрежение будет определяться по формуле

$$p = \rho gh(1 + d^2 / D^2) = \rho gh(1 + f / F),$$

где d, D – диаметры трубки и широкого сосуда соответственно, м; f, F – сечения трубки и широкого сосуда, м².

Так как соотношение диаметров или сечений трубки и сосуда значительны, понижением уровня h_2 при изменении давления можно пренебречь и отсчёт вести только по стеклянной трубке, т.е. по h_1 .

Однотрубные манометры имеют верхний предел измерения 1,6...10 кПа, приведённая погрешность измерения составляет 0,25...0,4%.

На рисунке 1.21, в показан однотрубный микроманометр, основанный на том же принципе, который применяется для измерения малых величин давления (до 2 кПа). В этом манометре стеклянная трубка расположена под углом α к горизонту. При этом точность измерения увеличивается в несколько раз.

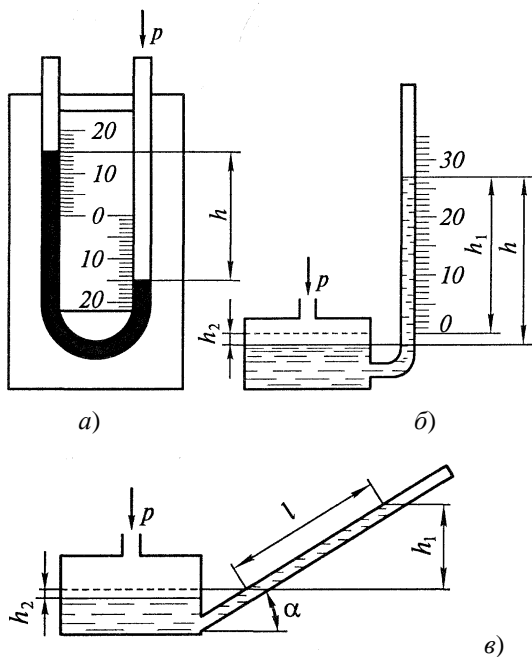


Рис. 1.21. Жидкостные манометры

Учитывая, что $h_1 = l \sin \alpha$ и пренебрегая малостью величины f/F , измеряемое давление можно определить из выражения

$$p = l \rho g \sin \alpha .$$

С уменьшением угла наклона трубки уменьшаются пределы измерения манометром и увеличивается чувствительность.

Рассмотренные выше жидкостные средства измерения давления характерны отсутствием дистанционной передачи показаний, небольшими пределами измерений и низкой прочностью. В то же время благодаря своей простоте, дешевизне и относительно высокой точности измерений они широко распространены в лабораториях и реже в промышленности при эпизодических измерениях и при проверке средств измерений других типов.

Деформационные средства измерения давления основаны на уравнивании силы, создаваемой давлением или вакуумом контролируемой среды на чувствительный элемент, силами упругих деформаций различного рода упругих элементов. Эта деформация в виде линейных или угловых перемещений передаётся регистрирующему устройству (показывающему или самопишущему) или преобразуется в электрический (пневматический) сигнал для дистанционной передачи.

В качестве чувствительных элементов используют одновитковые трубчатые пружины (рис. 1.22, *а*), многовитковые трубчатые пружины (рис. 1.22, *б*), упругие мембраны (рис. 1.22, *в*), упругие мембранные коробки (рис. 1.22, *г*, *д*), двойные упругие мембранные коробки (рис. 1.22, *е*, *ж*), пружинно-мембранные с гибкой мембраной (рис. 1.22, *з*), сильфонные (рис. 1.22, *и*) и пружинно-сильфонные (рис. 1.22, *к*).

Для изготовления мембран, сильфонов и трубчатых пружин применяются бронза, латунь, хромоникелевые сплавы, отличающиеся достаточно высокой упругостью, антикоррозийностью, малой зависимостью параметров от изменения температуры.

Рассмотрим подробнее некоторые деформационные средства измерения давления.

Мембранные приборы применяются для измерения небольших давлений (до 40 кПа) нейтральных газовых сред. Класс точности данных приборов – 2,5.

На рисунке 1.23 показана конструкция мембранного вакуумметра с профильной шкалой от 250 до 25 000 Па.

Чувствительным элементом служит мембранная коробка *б*, соединённая с изменяемой средой с помощью трубки *12*. Мембрана прикреплена к корпусу прибора с помощью штуцера *13*. Изменение давления измеряемой среды вызывает соответствующее изменение прогиба мембранной коробки *б*. При этом поводок *9*, прикреплённый к

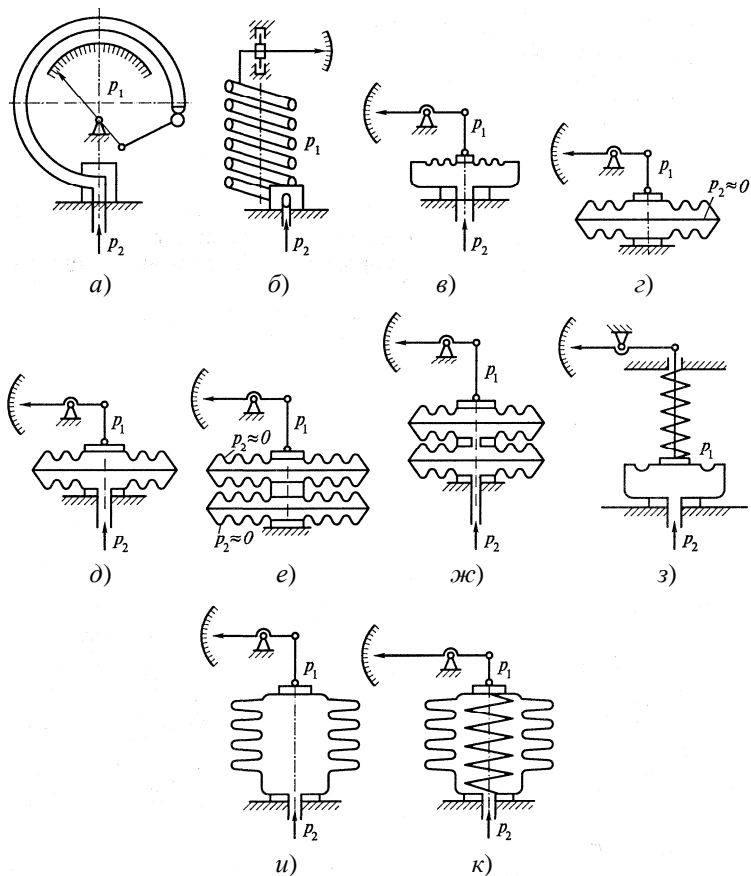


Рис. 1.22. Деформационные чувствительные элементы средств измерения давления

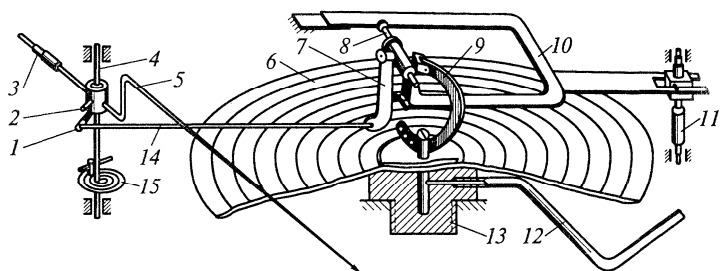


Рис. 1.23. Конструкция мембранного мановакуумметра с профильной шкалой

верхней части мембранной коробки 6, поворачивает рычаг 7, установленный на оси 8. Для увеличения жёсткости упругой системы ось 8 закреплена на плоской пружине 10. Поворот рычага 7 вызывает перемещение тяги 14 и рычага 1, установленного на оси 4. На этой же оси с помощью стопорного винта 2 закреплена указательная стрелка 5 с противовесом 3. Конец указательной стрелки 5 перемещается вдоль горизонтальной профильной шкалы. Спиральная пружина 15 служит для устранения влияния зазоров в сочленениях рычажного механизма. Для установки стрелки на начальную отметку шкалы служит винт 11 корректора нуля.

Сильфонные приборы предназначены для измерения избыточного и вакуумметрического давления неагрессивных газов с пределами измерений до 40 кПа, до 400 кПа (как манометры), до –100 кПа (как вакуумметры), в интервале –100...+300 кПа (как мановакуумметры).

Чувствительным элементом этих приборов является сильфон (рис. 1.22, *и*), представляющий собой тонкостенную цилиндрическую ёмкость с поперечной гофрировкой, которая изменяет свои линейные размеры при перепаде давлений внутри и вне её. Сильфоны изготавливают из фосфористой бронзы, нержавеющей стали или медноникелевого сплава.

Применяют сильфоны диаметром 8...150 мм толщиной стенки 0,1...0,3 мм, с числом волн 4; 6; 10 и 16.

Приборы рассматриваемого типа конструктивно состоят из двух частей: сильфонного блока и регистрирующего блока (показывающего или самопишущего). Оба блока встроены в единый корпус. Класс точности самопишущих приборов 1 или 1,5.

На рисунке 1.24 показана конструкция сильфонного самопишущего манометра. Измеряемое давление через штуцер 7 подаётся в камеру 6, где размещается сильфон 4. Внутренняя область сильфона 4 сообщается с атмосферой. Внутри сильфона 4 установлена пружина 5, противодействующая его сжатию. В доньшко сильфона 4 упирается штифт 3, соединённый с рычагом 2, передающим перемещение от сильфона 4 рычагу 1. Этот рычаг тягой 10 соединён с рычагом 9, передающим перемещение стрелке 8 с укреплённым на ней пером. След движения стрелки с пером записывается на диаграмме, перемещаемой часовым механизмом или синхронным двигателем.

Трубчато-пружинные приборы принадлежат к числу наиболее распространённых манометров, вакуумметров и мановакуумметров.

Трубчатая пружина представляет собой тонкостенную, согнутую по дуге окружности, трубку (одно- или многовитковую) с запаянным одним концом, которая изготавливается из медных сплавов или нержавеющей стали. При увеличении или уменьшении давления внутри трубки пружина раскручивается или скручивается на определенный угол.

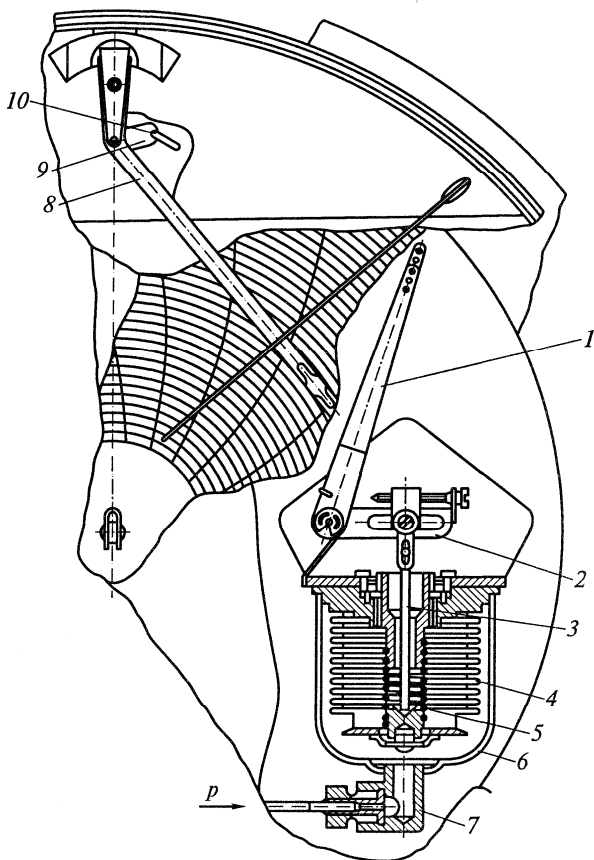


Рис. 1.24. Конструкция сифонного самопишущего манометра:

1, 2 и 9 – рычаг; 3 – штифт; 4 – сифон; 5 – пружина; 6 – камера; 7 – штуцер;
8 – стрелка; 10 – тяга

На рисунке 1.25 представлено устройство простейшего пружинного манометра. Он состоит из корпуса 1; полая трубка 2, выполненная в форме согнутой по кругу на угол 270° с поперечным овальным сечением, с одной стороны свободна и наглухо закрыта, а с другой – впаяна в держатель, который присоединён к источнику измеряемого давления при помощи штуцера 8. Закрытый конец трубки поводком 7 соединён с зубчатым сектором 6, который зацеплен с шестернёй 5, установленной на одной оси с показывающей стрелкой 4. Под действием избыточного давления трубка разгибается, её свободный конец перемещается и тянет поводок 7, который поворачивает связанный с

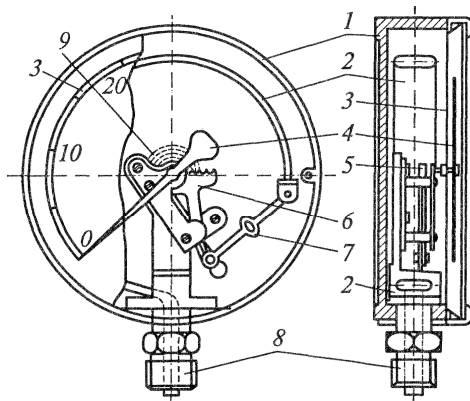


Рис. 1.25. Устройство пружинного манометра:

- 1 – корпус; 2 – полая трубка; 3 – шкала;
 4 – стрелка; 5 – шестерня; 6 – зубчатый сектор;
 7 – поводок; 8 – штуцер; 9 – пружина

ним зубчатый сектор 6. Последний вращает шестерню 5 и стрелку 4, указывающую по шкале 3 величину измеряемого давления. Для устранения мёртвого хода между зубьями сектора и шестерни применена спиральная пружина 9.

Манометры рассмотренного типа выпускаются для верхних пределов измерения 60...160 кПа. Вакуумметры выпускаются со шкалой 0...100 кПа. Мановакуумметры имеют пределы измерений от –100 кПа до 60 кПа...2,4 МПа. Класс точности для рабочих манометров 0,6...4, для образцовых – 0,16; 0,25; 0,4.

Все рассмотренные выше деформационные средства измерения давления относятся к недистанционным схемам, основанным на принципе прямого преобразования деформации в сигнал, поступающий на показывающее устройство.

Грузопоршневые манометры (рис. 1.26, а) применяются как устройство для проверки механических контрольных и образцовых манометров среднего и высокого давления. Давление в них определяется по калиброванным грузам 5, помещаемым на поршне 4. В качестве рабочей жидкости применяют керосин, трансформаторное или касторовое масло. Показания грузопоршневых манометров необходимо корректировать на непостоянство силы тяжести g , используя формулу для нахождения поправки

$$\Delta p = (g / 9,8066 - 1) .$$

Класс точности грузопоршневых манометров 0,05 и 0,02%.

На рисунке 1.26, б представлена конструкция установки для проверки манометров, основанной на принципе грузопоршневых манометров. Она состоит из корпуса 5, на котором крепится измерительная колонка 3. Внутренняя полость через воронку 8 и игольчатый клапан 9 заполняется маслом. При этом винт насоса 6 выворачивается из корпуса 5 и засасывает масло из воронки 8. Канал в корпусе 5 соединяется со штуцерами 4 и 7, которые служат соответственно для установки контрольного и поверяемого манометров. С тем же каналом соединена измерительная колонка 3, имеющая внутри поршень 2 и тарелку для установки грузов 1. При открытых ventилях B_1 и B_2 давление жидкости, на которую воздействует поршень 2, нагруженный образцовым грузом, передается поверяемому манометру M . Сравнивая это давление жидкости с показаниями манометра, определяют его погрешность.

Электрические манометры и вакуумметры. Развитие полупроводниковой техники и микроэлектроники позволяет разрабатывать и создавать более совершенные средства измерения давления в широких диапазонах величин. Действие приборов этой группы основано на свойстве некоторых материалов изменять свои электрические параметры под действием давления.

Пьезоэлектрические манометры применяют при измерении пульсирующего с высокой частотой давления в механизмах с допустимой

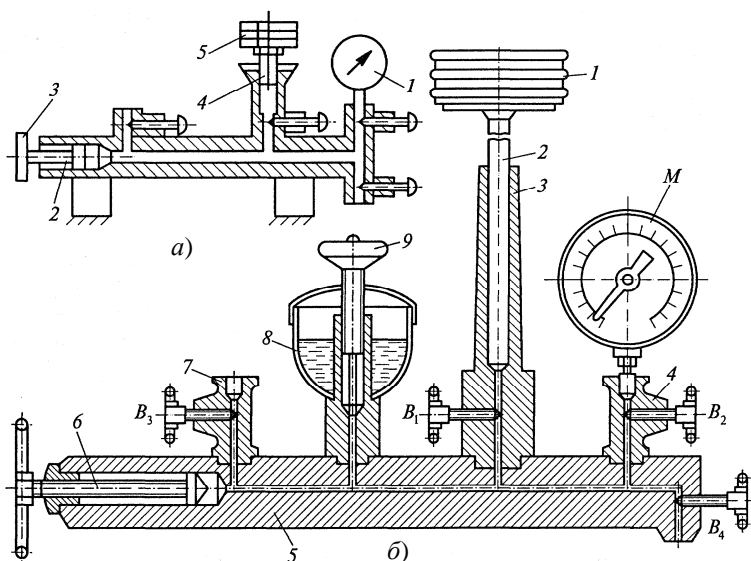


Рис. 1.26. Грузопоршневые манометры

нагрузкой на чувствительный элемент до $8 \cdot 10^3$ ГПа. Чувствительным элементом в пьезоэлектрических манометрах, преобразующим механические напряжения в колебания электрического тока, являются пластины цилиндрической или прямоугольной формы толщиной в несколько миллиметров из кварца, титаната бария или керамики типа ЦТС (цирконат–титанат свинца).

Конструкция преобразователя пьезоэлектрического манометра показана на рис. 1.27. Измеряемое давление через мембрану 7 действует на пьезоэлементы 8 и 9, расположенные так, что на их внутренних гранях, соприкасающихся с металлической прокладкой 4, возникают одноименные заряды. Потенциал с внутренних граней пластин снимается изолированным проводником 3, присоединенным к прокладке 4, а с внешних граней пьезоэлементов – через корпус и металлические прокладки 2 и 5, мембрану 7 и шарик 10, крышку 1. Штуцер 6, зажимающий мембрану 7, служит для присоединения чувствительного элемента к объекту измерения.

Величина электрического заряда будет прямо пропорциональна давлению

$$q = kpS,$$

где q – заряд, Кл; k – пьезоэлектрическая постоянная, Кл/Н; p – давление, Па; S – площадь поверхности пластин, м^2 .

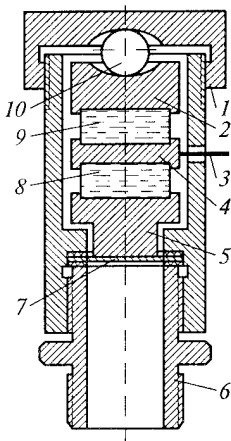


Рис. 1.27. Конструкция преобразователя пьезоэлектрического манометра

1 – крышка; 2, 4 и 5 – металлическая прокладка; 3 – проводник; 6 – штуцер; 7 – мембрана; 8 и 9 – пьезоэлемент; 10 – шарик

Тензометрические манометры имеют малые габаритные размеры, простое устройство, высокую точность и надежность в работе. Верхний предел показаний 0,1...40 МПа, класс точности 0,6; 1 и 1,5. Применяются в сложных производственных условиях.

В качестве чувствительного элемента в тензометрических манометрах применяются тензорезисторы, принцип действия которых основан на изменении сопротивления под действием деформации.

Конструкция тензометрического манометра приведена на рис. 1.28. Манометр имеет цилиндрический кор-

пус 4, образующий в верхней части упругую мембрану, а в нижней – штуцер для подвода измеряемого давления p . К мембране припаяна круглая сапфировая пластина 1, на поверхность которой нанесены тонкопленочные полупроводниковые тензорезисторы $R_1...R_4$ из монокристаллического кремния.

Тензорезисторы с помощью припаянных к ним выводных проводов 5, соединены со сборными пластинками 2, закрепленными на кольце из диэлектрика 3.

Давление в манометре измеряется схемой неуравновешанного моста, плечами которого являются тензорезисторы $R_1...R_4$.

Подобную конструкцию имеют датчики-преобразователи типа «Сапфир», которые применяются в системах контроля, регулирования и управления технологическими процессами путем непрерывного преобразования давления среды в стандартный токовый выходной сигнал с передачей его на вторичные приборы или исполнительные механизмы. Преобразователи давления этого типа служат: для измерения абсолютного давления (имеют в обозначение маркировку «ДА»), измерения избыточного давления («ДИ»), измерения вакуума («ДВ»), измерения давления – разряжения («ДИВ»), гидростатического давления («ДГ»), разности давлений («ДД»). На рис. 1.29 показан внешний вид датчика «Сапфир-22МР-ДИ».

Преобразователи Сапфир-22МР имеют универсальный микропроцессорный электронный блок. Встроенный фильтр радиопомех, защита от импульсов высоких энергий, взрывозащищенное исполнение с видом взрывозащиты, «искробезопасная электрическая цепь» и

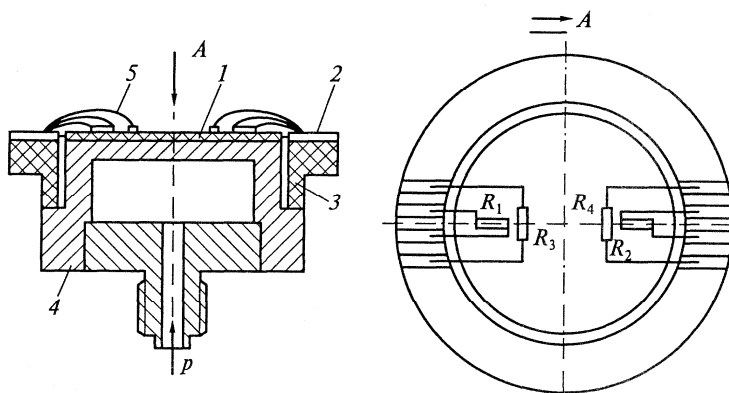


Рис. 1.28. Конструкция тензометрического манометра:

1 – сапфировая пластина; 2 – сборные пластинки; 3 – кольцо из диэлектрика;
4 – корпус; 5 – выводные провода

«взрывонепроницаемая оболочка» позволяют использовать преобразователи давления Сапфир-22МР в жёстких условиях эксплуатации. Преобразователь состоит из измерительного и электронного блоков. Электронный блок имеет встроенный цифровой жидкокристаллический индикатор (ЖКИ). Наличие ЖКИ позволяет наблюдать цифровое значение измеряемой величины и контролировать процесс изменения характеристик преобразователя с помощью встроенной клавиатуры, управляемой магнитным манипулятором, поставляемым в комплекте.



Рис. 1.29. Внешний вид датчика Сапфир-22МР-ДИ

Манипулятор позволяет выполнить следующие операции по установке и изменению характеристик преобразователя:

- проверка функционирования манипулятора;
- корректировка «нуля» (калибровка/смещение);
- калибровка верхнего предела измерения;
- перенастройка верхнего предела измерений;
- настройка на смещенный диапазон измерений;
- выбор вида номинальной статической характеристики (линейно-возрастающей, линейно-убывающей, типа «корень квадратный»);
- выбор постоянного времени установления выходного сигнала;
- выбор единицы измерения значения измеряемой величины, отображаемой на ЖКИ;
- выбор отображаемого на ЖКИ измеряемого параметра или температуры;
- самодиагностика с указанием кода ошибок.

Принцип действия *тепловых вакуумметров* (рис. 1.30) основан на зависимости теплопроводности газовой среды от степени её разрежения.

В обеих схемах чувствительным элементом является нагретая путём пропускания электрического тока платиновая нить 3, расположенная в вакуумном баллоне 2. При увеличении разрежения среды её теплопроводность будет уменьшаться, следовательно, нагретая платиновая нить будет хуже отдавать тепло стенкам вакуумного баллона 2, в результате чего её температура будет возрастать. Измеряя температуру нити, можно судить о наличии вакуума. Температура нагрева нити должна быть около +100 °С для исключения теплопередачи за счёт лучеиспускания.

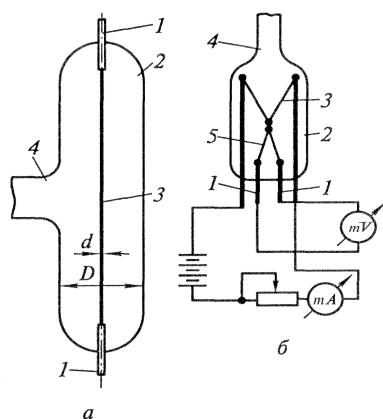


Рис. 1.30. Тепловые вакуумметры:

- a* – сопротивления;
- б* – термопарный;
- 1 – электрические вводы;
- 2 – вакуумный баллон;
- 3 – платиновая нить;
- 4 – соединительная трубка;
- 5 – датчик температуры

Температура нити измеряется милливольтметром, подключаемым через электрические вводы 1 к термопреобразователю 5.

Тепловые вакуумметры применяются для измерения очень малых величин давления (вакуума).

Дифференциальные манометры применяются для измерения разности (перепада) давления жидкостей и газов. Они могут быть использованы для измерения расхода газов и жидкостей, уровня жидкости, а также для измерения малых избыточных и вакуумметрических давлений.

Наиболее широкое распространение в промышленности в последнее время получили мембранные и сильфонные дифференциальные манометры.

Мембранные дифференциальные манометры, представляют собой дифференциальный датчик давления с общим упругим элементом в виде мембраны или мембранной коробки. Они являются бесшкальными первичными измерительными приборами, предназначенными для измерения давления неагрессивных сред, преобразующими измеряемую величину в унифицированный аналоговый сигнал постоянного тока 0...5 мА, переменного тока взаимной индукции 0...10 мГн или в пневматический сигнал давлением 20...100 кПа.

Для примера рассмотрим дифманометр мембранный типа ДМ, который представляет собой бесшкальный датчик мембранного типа (рис. 1.31) с дифференциально-трансформаторной системой передачи значения измеряемой величины на вторичный прибор.

Чувствительным элементом дифманометра является мембранный блок, состоящий из двух мембранных коробок 1 и 3, заполненных кремнийорганической жидкостью, находящихся в двух отдельных камерах, разделенных перегородкой 2.

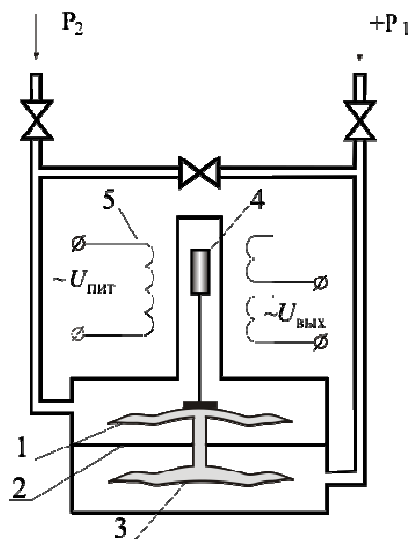


Рис. 1.31. Устройство мембранного дифманометра типа ДМ

К центру верхней мембраны прикреплён железный сердечник 4 дифференциально-трансформаторного преобразователя 5.

В нижнюю камеру подаётся большее (плюсовое) измеряемое давление, в верхнюю – меньшее (минусовое) давление. Сила измеряемого перепада давления уравнивается за счёт других сил, возникающих при деформации мембранных коробок 1 и 3.

При увеличении перепада давления мембранная коробка 3 сжимается, жидкость из неё перетекает в коробку 1, которая расширяется и перемещает сердечник 4 дифференциально-трансформаторного преобразователя. При уменьшении перепада давления сжимается мембранная коробка 1 и жидкость из неё вытесняется в коробку 3. Сердечник 4 при этом перемещается вниз. Таким образом, положение сердечника, т.е. выходное напряжение дифференциально-трансформаторной схемы однозначно зависит от значения перепада давления.

Мембранные дифференциальные манометры являются бесшкальными первичными измерительными приборами, предназначенными для измерения давления неагрессивных сред, преобразующими измеряемую величину в унифицированный аналоговый сигнал постоянного тока 0...5 мА, переменного тока взаимной индукции 0...10 мГн или в пневматический сигнал давлением 20...100 кПа.

Сильфонные дифференциальные манометры. На рисунке 1.32 показана конструкция сильфонного дифференциального манометра с

магнитным преобразователем. Измерительный блок дифференциального манометра состоит из сильфона 1, в который встроена пружина 2, её жёсткость определяет диапазон измеряемого перепада давления. Сильфон 1 жёстко соединён с плоской пружинной подвеской 3, с которой связан магнитный сердечник 4. Магнитный сердечник 4 находится внутри разделительной трубки 5 из немагнитной стали, на которой установлен преобразователь 6 с магнитной компенсацией. Рядом с преобразователем 6 расположен транзисторный усилитель 7. Подвод давления p_1 и p_2 в камеры дифференциального манометра осуществляется через импульсные трубки. Под воздействием разности давлений ($p_1 - p_2$) сильфон 1 сжимается, вызывая перемещение его дна. При этом перемещается магнитный сердечник 4 преобразователя 6, воздействующий на магнитный усилитель, выходной сигнал которого дополнительно усиливается и в виде унифицированного сигнала 0...5 мА поступает к вторичному прибору.

Сильфонные дифференциальные манометры выпускаются на предельные перепады давления 1...4 кПа, они рассчитаны на предельно допустимое рабочее избыточное давление 25 кПа.

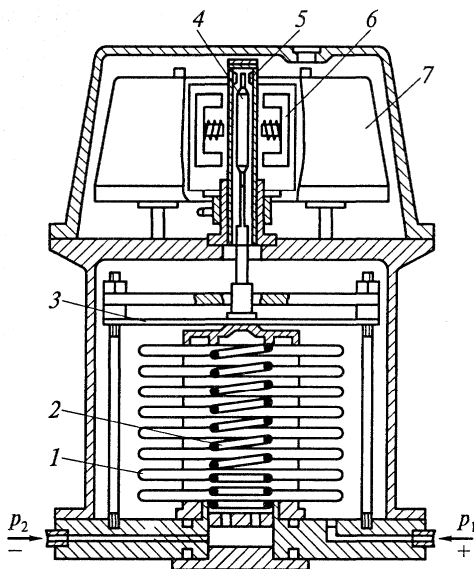


Рис. 1.32. Конструкция сильфонного дифманометра

1.9. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ

Приборы для измерения массы называют весами. При каждом взвешивании выполняют хотя бы одну из четырёх основных операций – определение неизвестной массы тела («взвешивание»), отмеривание определённого количества массы («отвешивание»), определение класса, к которому относится подлежащее взвешиванию тело («тарировочное взвешивание» или «сортировка»), взвешивание непрерывно протекающего материального потока.

Измерение массы основано на использовании закона всемирного тяготения, согласно которому гравитационное поле Земли притягивает массу с силой, пропорциональной этой массе. Силу притяжения сравнивают с известной по величине силой, создаваемой различными способами:

- 1) для уравновешивания используется груз известной массы;
- 2) уравновешивающее усилие возникает при деформации упругого элемента;
- 3) уравновешивающее усилие создаётся пневматическим устройством;
- 4) уравновешивающее усилие создаётся гидравлическим устройством;
- 5) уравновешивающее усилие создаётся электродинамически при помощи соленоидной обмотки, находящейся в постоянном магнитном поле;
- 6) уравновешивающее усилие создаётся при погружении тела в жидкость.

Первый способ является классическим. Мерой во втором способе является величина деформации; в третьем – давление воздуха; в четвёртом – давление жидкости; в пятом – ток, протекающий по обмотке; в шестом – глубина погружения и подъёмная сила.

Классификация весов приведена на рис. 1.33.

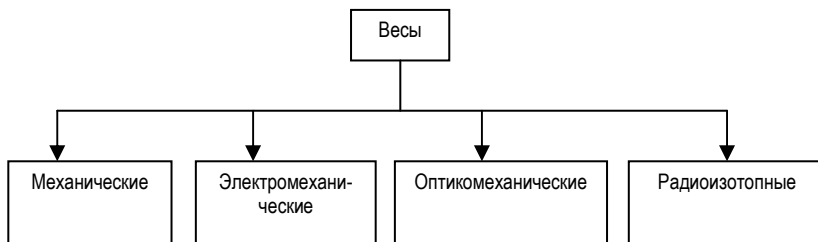


Рис. 1.33. Классификация весов

Механические весы основаны на принципе сравнения масс при помощи рычагов, пружин, поршней и чашек весов (рис. 1.34 и 1.35).

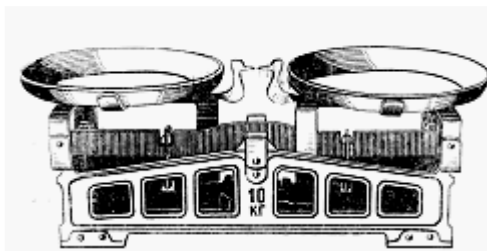


Рис. 1.34. Рычажные торговые весы



Рис. 1.35. Торговые механические весы РН-3Ц13УМ

В электромеханических весах усилие, развиваемое взвешиваемой массой, измеряется через деформацию упругого элемента с помощью тензорезисторных, индуктивных, ёмкостных и виброчастотных преобразователей.

На рисунке 1.36 показан внешний вид *виброчастотного датчика электронных весов* фирмы «ТВЕС» (Тамбовская область). На основании 1 крепится упругий элемент 2, в отверстии которого находится струна 3, выполненная заодно с ним. По обе стороны от струны находятся катушки электромагнита 4 и преобразователя перемещений 5 индуктивного типа. К верхней поверхности упругого элемента крепится жёсткая пластина 6 с опорами 7, на которые помещается основание грузоприёмной платформы. Для ограничения деформации упругого элемента имеется предохранительный стержень 8.

Принцип действия датчика соответствует описанию, приведённому в разделе 1.6. Электромагнит и преобразователь перемещений, совместно с усилителем образуют автогенератор, в котором постоянно происходит вибрация струны на собственной частоте 5...6 кГц. Под воздействием силы тяжести P груза происходит деформация упругого элемента 2 и натяжение струны 3, что вызывает увеличение механического напряжения в струне и повышение собственной частоты её колебаний.

Зависимость частоты колебаний струны от нагрузки имеет нелинейный характер и приближённо описывается формулой

$$f = f_0 \sqrt{1 + AP},$$

где f_0 – частота колебаний струны при отсутствии нагрузки; P – вес груза; A – постоянный коэффициент.

На практике статическая характеристика датчика разбивается на несколько линейных участков, координаты концов которых определяются при градуировке. Таким образом, реальная статическая характеристика заменяется кусочно-линейной зависимостью.

Дополнительная погрешность весов, возникающая при изменении температуры, имеет преимущественно аддитивный характер и компенсируется установкой на «0».

Внешний вид одной из модели электронных весов фирмы «ТВЕС» с виброчастотным датчиком показан на рис. 1.37.

В последнее время широкое применение получили *электромеханические весы с кварцевым пьезоэлементом* (рис. 1.38). Этот пьезоэлемент представляет собой тонкую (не более 200 мкм) плоскопараллельную кварцевую пластину прямоугольной формы с электродами, расположенными в центре по обе стороны пластины. Датчик имеет два пьезоэлемента, приклеенные на упругие элементы, которые реализуют дифференциальную схему нагружения преобразователей. Сила тяжести груза вызывает сжатие одного упругого элемента и растяжение другого.

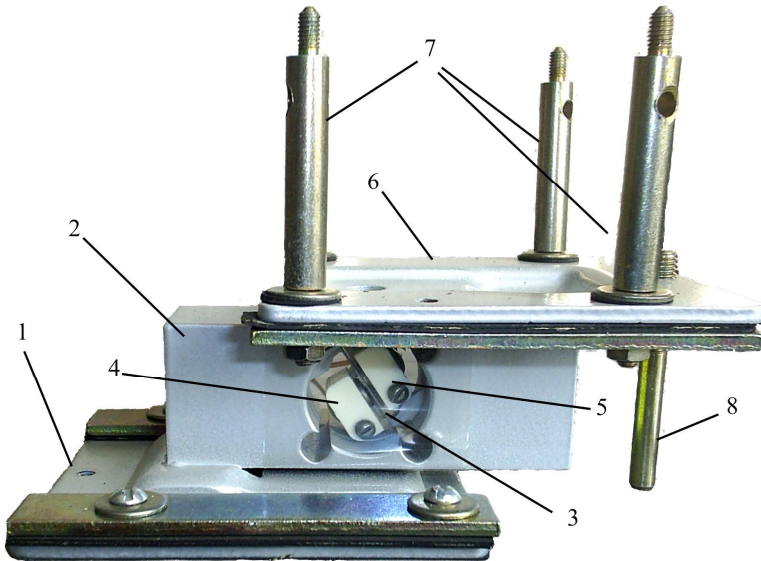


Рис. 1.36. Виброчастотный датчик весов фирмы «ТВЕС»



Рис. 1.37. Электронные настольные весы с виброчастотным датчиком фирмы «ТВЕС»



Рис. 1.38. Электронные весы с тензокварцевым преобразователем фирмы «Мера»

Таким образом, по способу установки на деформируемое тело преобразователи этого типа аналогичны тензорезисторам. По этой причине их называют *тензокварцевыми преобразователями*. В теле каждого пьезоэлемента возбуждаются автоколебания на собственной частоте, которая зависит от механического напряжения, возникающего в пьезоэлементе под воздействием нагрузки. Выходной сигнал преобразователя, так же как и у виброчастотного датчика – частота в диапазоне 5...7 кГц. Однако тензокварцевые преобразователи имеют линейную статическую характеристику и в этом их преимущество. Чувствительные элементы изолированы от окружающей среды, что уменьшает погрешность из-за колебаний влажности окружающего воздуха. Кроме этого, при помощи отдельного термочувствительного кварцевого резонатора вносится поправка на изменение температуры в активной зоне датчика.

Радиоизотопные преобразователи веса основаны на измерении интенсивности ионизирующего излучения, прошедшего через измеряемую массу. У преобразователя абсорбционного типа интенсивность излучения уменьшается с увеличением толщины материала, а у преоб-

разователя рассеянного излучения интенсивность воспринимаемого рассеянного излучения растёт с увеличением толщины материала. Отличием радиоизотопных весов являются малые измеряемые усилия, универсальность и нечувствительность к высоким температурам, а электромеханических весов с тензометрическими преобразователями – дешевизна и высокая точность измерения.

По назначению весоизмерительные и весодозирующие устройства разделяют на следующие шесть групп:

- 1) весы дискретного действия;
- 2) весы непрерывного действия;
- 3) дозаторы дискретного действия;
- 4) дозаторы непрерывного действия;
- 5) образцовые весы, гири, передвижные весоупроверочные средства;
- 6) устройства для специальных измерений.

К первой группе относят лабораторные весы различных типов, представляющие отдельную группу весов с особыми условиями и методами взвешивания, требующие высокой точности показаний; весы настольные с наибольшим пределом взвешивания (НПВ) до 100 кг, весы платформенные передвижные и врезные с НПВ до 15 т; весы платформенные стационарные, автомобильные, вагонеточные, вагонные (в том числе и для взвешивания на ходу); весы для металлургической промышленности (к ним относятся системы шихтоподачи для питания доменных печей, электровагонвесы, углезагрузочные весы для коксовых батарей, весовые тележки, весы для жидкого металла, весы для блюмов, слитков, проката и т.д.).

Весы первой группы изготавливают с коромыслами шкального типа, циферблатными квадратными указателями и цифропоказывающими и печатающими указательными приборами и пультами. Для автоматизации взвешивания применяют печатающие аппараты автоматической записи результатов взвешивания, суммирования итогов нескольких взвешиваний и аппараты, обеспечивающие дистанционную передачу показаний весов.

Ко второй группе относят конвейерные и ленточные весы непрерывного действия, ведущие непрерывный учёт массы транспортируемого материала. Конвейерные весы отличаются от ленточных непрерывного действия тем, что их выполняют в виде отдельного весового устройства, устанавливаемого на определённом участке ленточного конвейера. Ленточные весы представляют собой самостоятельные ленточные конвейеры небольшой длины, оснащённые весоизмерительным устройством.

К третьей группе относят дозаторы для суммарного учёта (порционные весы) и дозаторы для фасовки сыпучих материалов, используе-

Контроль ведётся по трём условиям: норма, меньше нормы и больше нормы. Мерой служит ток в катушке электромагнита. Дискриминатором является система взвешивания со столом 3 и электромагнитным устройством 1, индуктивным преобразователем 2 перемещения с выходным усилителем и релейным устройством 7. При нормальной массе объектов контроля система находится в равновесном состоянии, и объекты перемещаются транспортёром 6 к месту их сбора. Если масса объекта отклоняется от нормы, то происходит смещение стола 3, а также сердечника индуктивного преобразователя. Это вызывает изменение силы тока в цепи катушки индуктивности и напряжения на резисторе R . Релейный дискриминатор включает исполнительное устройство 4, сбрасывающее объект с ленты транспортёра. Релейное устройство может быть трёхпозиционным с переключательным контактом, что позволяет сбрасывать объекты вправо или влево относительно ленты транспортёра в зависимости от того, меньше или больше нормы масса бракуемого объекта.

Данный пример наглядно показывает, что результатом контроля является не численное значение контролируемой величины, а событие – годен или не годен объект, т.е. находится контролируемая величина в заданных границах или нет.

2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ

Измерение уровня жидкостей и сыпучих тел относится к числу вспомогательных контрольных операций, позволяющих определить количество жидкости или сыпучего тела в хранилище для учёта продуктов и сигнализации о переполнении расходных баков и бункеров. Приборы, предназначенные для этой цели, называются уровнемерами широкого диапазона. Эти приборы имеют шкалу с нулём в начале и делениями, идущими от нуля в одну сторону. Единицы измерения – сантиметры, дециметры и метры.

Кроме того, измерение уровня необходимо для поддержания его на заданной высоте. В этом случае приборы показывают величину отклонения уровня от нормального положения и называются уровнемерами узкого диапазона. Шкала прибора имеет нуль посередине и деления, идущие в обе стороны от нуля. Пределы измерений обычно составляют от ± 100 до ± 150 мм. Единицы измерения в узком диапазоне – сантиметры и миллиметры.

Устройства для измерения уровня жидкостей можно подразделить на следующие, с указанием степени их распространения:

- визуальный;
- поплавковый;
- гидростатический;

- кондуктометрический;
- ёмкостной;
- на основе измерения времени прохождения сигнала.

2.1. ВИЗУАЛЬНЫЕ УРОВНЕМЕРЫ

Простейшим измерителем уровня жидкости служат указательные стёкла (рис. 2.1). Работа указательных стёкол основана на принципе сообщающихся сосудов. Указательное стекло соединяют с сосудом нижним концом (для открытых сосудов) или обоими концами (для сосудов с избыточным давлением или разряжением). Наблюдая за положением уровня жидкости в стеклянной трубке, можно судить об изменении уровня в сосуде.

Указательные стёкла снабжают вентилями или кранами для отключения их от сосуда и продувки системы. В арматуру указательных стёкол сосудов, работающих под давлением, обычно вводят предохранительные устройства, автоматически закрывающие каналы в головках при случайной поломке стекла. Плоские указательные стёкла рассчитаны на давление до 2,94 МПа и температуру до 300 °С. Указательные стёкла не рекомендуется употреблять длиной более 0,5 м, поэтому при контроле уровня, изменяющегося больше чем на 0,5 м, устанавливают несколько стёкол так (рис. 2.1, в), чтобы верх предыдущего стекла перекрывал низ последующего.

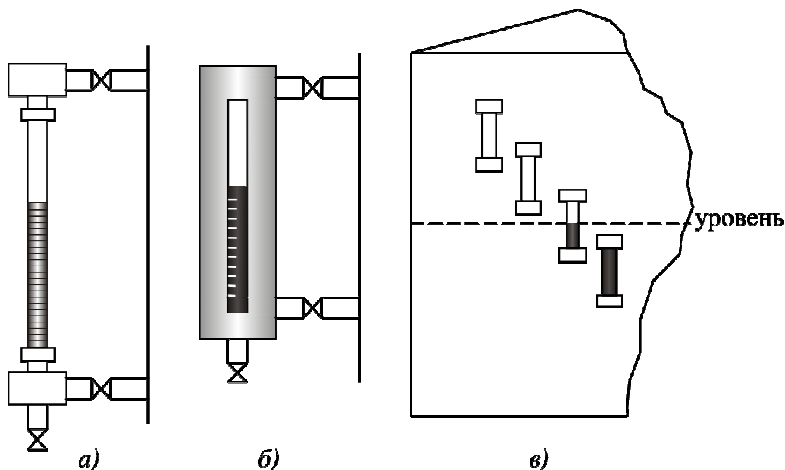


Рис. 2.1. Указательные стёкла:

а – проходящего света, *б* – отражённого света,
в – несколько указательных стёкол на высоких резервуарах

2.2. ПОПЛАВКОВЫЕ УРОВНЕМЕРЫ

Чувствительным элементом данного уровнемера является поплавок *1*, плавающий на поверхности жидкости (рис. 2.2). Поплавок уравновешивается грузом *2*, который связан с поплавком гибким тросом *3*. Положение груза относительно шкалы определяет уровень жидкости. Пределы измерения устанавливаются в соответствии с принятыми значениями верхнего *4* и нижнего *5* уровней.

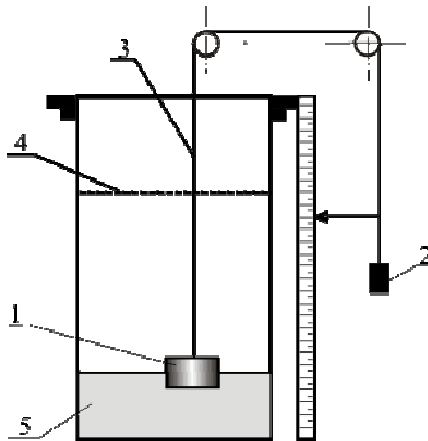


Рис. 2.2. Поплавковый уровнемер

Основной эксплуатационный недостаток поплавков — возможность коррозии и протравления тонких стенок поплавка, приводящих к его потоплению. Это ограничивает область применения поплавковых измерителей уровня. Значительно более надёжны тонущие поплавки — массивные буйки *1* (рис. 2.3).

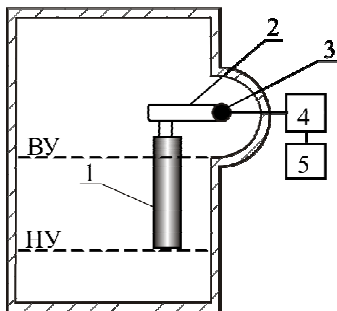


Рис. 2.3. Тонущий поплавок-буйек

При изменении уровня жидкости изменяется по закону Архимеда действующая на конец рычага 2 сила (вес буйка) и, соответственно, изменяется момент сил, действующих на рычаг. Изменяющийся при колебаниях уровня момент сил от буйка 1 передаётся через вал 3 на весоизмерительное устройство 4, а далее на вторичный прибор 5, отградуированный в единицах уровня жидкости.

Буйковые измерители уровня чаще всего используются как устройства информации в системах автоматического регулирования, защиты и сигнализации.

Интервал измерения уровня поплавковых и буйковых уровнемеров выбирают из ряда: от 0 до 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10,0; 16,0 и 20 м. Класс точности может быть 0,6; 1,0; 1,6 и 2,5. Для учётно-расчётных операций уровнемеры изготавливаются с основными погрешностями от $\pm 1,0$ до 10,0 мм (ГОСТ 13702–78).

2.3. ГИДРОСТАТИЧЕСКИЕ УРОВНЕМЕРЫ

Данный метод измерения уровня основан на определении гидростатического давления, оказываемого жидкостью на дно резервуара. Величина гидростатического давления p на дно резервуара зависит от высоты столба жидкости над измерительным прибором h и от плотности жидкости ρ : $p = \rho gh$, соответственно $h = p/\rho g$, где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ (справедливо только для неподвижных жидкостей).

Для измерения гидростатического давления можно использовать датчик 5 типа Метран-100-ДГ (рис. 2.4, а, б). Эти датчики обычно устанавливаются на боковой стенке резервуара вблизи дна. Возможна установка датчика в дно резервуара при условии доступа к нему во время монтажа и эксплуатации, а также при отсутствии возможности осаждения веществ, растворённых в жидкости, на мембране датчика 5. В закрытых резервуарах давление над жидкостью $P_{\text{изб}}$ оказывает влияние на результат измерения. Поэтому давление $P_{\text{изб}}$ необходимо подать на датчик давления 5, соединив статическую полость датчика с объёмом резервуара над жидкостью (рис. 2.4, б).

Гидростатическое давление можно измерять также при помощи дифференциального манометра, например, типа Метран-100-ДД. Дифманометром можно также измерять уровень в открытых и закрытых сосудах, т.е. в сосудах, находящихся под давлением и разрежением. На рис. 2.4, в показана схема трубных соединений при измерении уровня в открытом резервуаре 1. При применении дифманометров для измерения уровня обязательно устанавливают уравнительный сосуд 3 (рис. 2.4, в), наполненный до определённого уровня той же жидкостью, что находится в резервуаре.

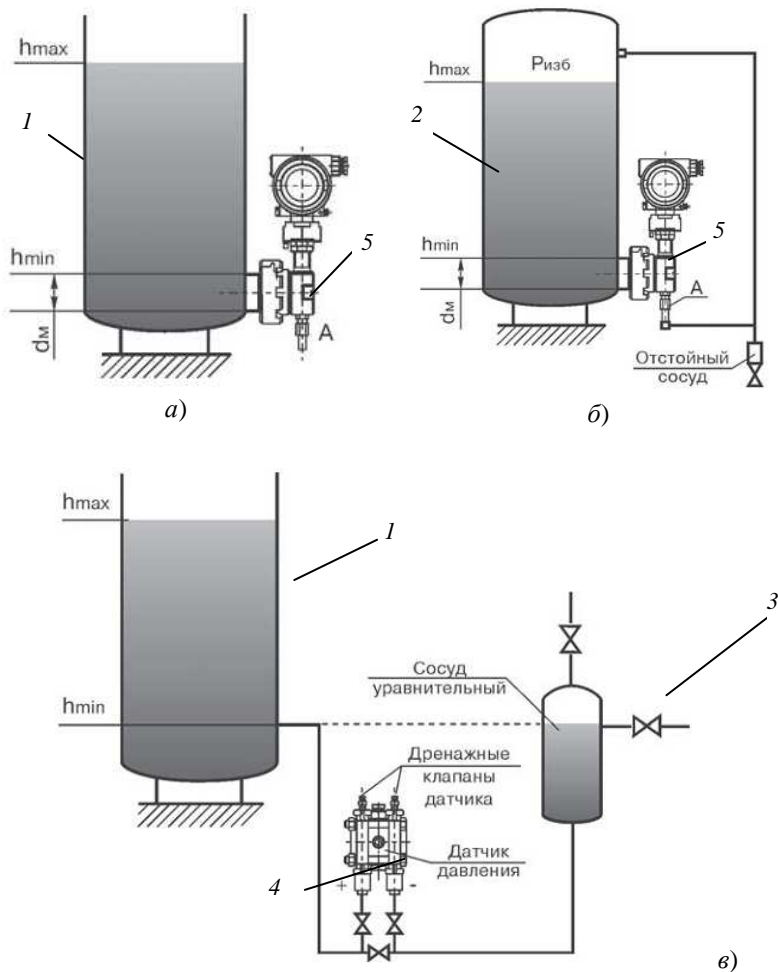


Рис. 2.4. Схема трубных соединений с размещением дифманометра ниже дна резервуара:

- а* – при измерении уровня жидкости в открытом резервуаре;
- б* – при измерении уровня жидкости в резервуаре, находящемся под давлением;
- в* – измерение уровня в открытом сосуде с использованием уравнивающего сосуда

Назначение уравнивающего сосуда – обеспечение постоянного столба жидкости в одном из колен дифманометра. Плотность жидкостей в сосуде и резервуаре должны быть одинаковы. Высота столба жидкости во втором колене дифманометра изменяется с изменением

уровня в резервуаре. Каждому значению уровня в резервуаре соответствует определённый перепад давления, показываемый дифманометром, что позволяет судить о положении уровня. Для устранения влияния давления $P_{изб}$ или разрежения в закрытом резервуаре на показания дифманометра 4 необходимо использовать трубное соединение резервуара и уравнительного сосуда 3.

Основные достоинства гидростатического метода:

- точность;
- пена, отложения, изменение электрических свойств жидкости и форма резервуара не оказывают влияния на результат измерения;
- реализация метода не предполагает применения подвижных механизмов;
- соответствующее оборудование не нуждается в сложном техническом обслуживании.

Недостатки:

- движение жидкости вызывает изменение давления и приводит к ошибкам измерения;
- атмосферное давление должно быть скомпенсировано;
- изменение плотности жидкости может быть причиной ошибки измерения.

2.4. ПЬЕЗОМЕТРИЧЕСКИЕ УРОВНЕМЕРЫ

Их работа основана на принципе гидравлического затвора. Для измерения уровня (рис. 2.5) используется воздух или инертный газ под давлением, который продувают через слой жидкости. Количество продуваемого воздуха ограничивают диафрагмой D или иным способом

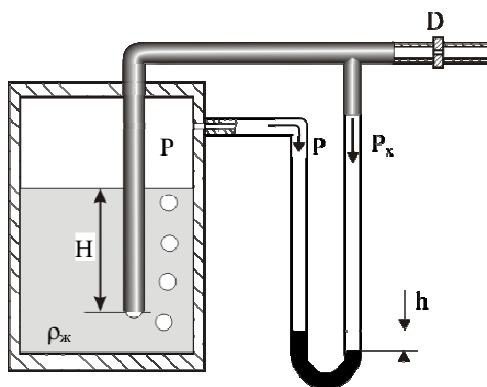


Рис. 2.5. Схема пьезометрического измерителя уровня

так, чтобы скорость движения его в трубопроводе была минимально возможной. Это приближает к нулю потери на трение в трубопроводе после диафрагмы D . Уровень жидкости определяется по установившемуся давлению $(P - P_x)$ в системе:

$$P - P_x = H \cdot \rho_{ж} \cdot g,$$

откуда $H = (P - P_x) / \rho_{ж} \cdot g$. Давление $(P - P_x)$ определяется по высоте h столба жидкости U -образного манометра или любым иным способом.

2.5. ЁМКОСТНЫЕ УРОВНЕМЕРЫ

Ёмкостные преобразователи применяются для измерения и сигнализации уровня как электропроводных, так и неэлектропроводных жидкостей. Эти преобразователи ёмкостных уровнемеров выполняют цилиндрического и пластинчатого типа, а также в виде жёсткого стержня или троса. В последнем случае вторым электродом служит металлическая стенка резервуара. Для обеспечения постоянства характеристик преобразователя и повышения точности измерения уровня целесообразно применять преобразователи со стержнем или тросом, располагаемым в стальной трубе, являющейся вторым электродом преобразователя.

Рассмотрим приведённую на рис. 2.6 схему устройства ёмкостного преобразователя уровнемера, выполненного в виде цилиндрического конденсатора из двух коаксиально расположенных стальных труб 2

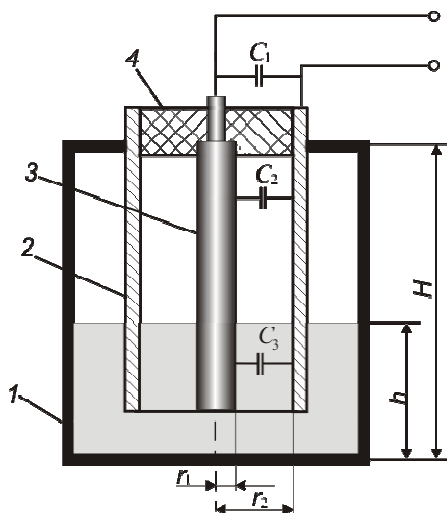


Рис. 2.6. Ёмкостный уровнемер

и 3, изолированных друг от друга слоем диэлектрика 4, и предназначенного для измерения уровня неэлектропроводных сред. Для большей наглядности преобразователь погружён в резервуар 1, в котором производится измерение уровня жидкости.

Ёмкость преобразователя C , измеренная на зажимах, когда между электродами 2 и 3 на рабочем их участке высотой h находится жидкость, определяется выражением

$$C = C_1 + C_2 + C_3,$$

где C_1 – ёмкость между жилами соединительного кабеля; C_2 – ёмкость преобразователя на участке высотой $(H - h)$ заполненном воздухом и парами жидкости с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ_1

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_1\epsilon_0(H-h)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)},$$

где ϵ_0 – электрическая постоянная или абсолютная диэлектрическая проницаемость свободного пространства ($\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м); C_3 – ёмкость участка преобразователя высотой h , погружённого в жидкость с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{ж}$

$$C_3 = \frac{2\pi\epsilon_{ж}\epsilon_0 h}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}.$$

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_1 большинства газов и паров мало отличается от единицы. В то время как для большинства жидкостей $\epsilon_{ж}$ в десятки раз больше ϵ_1 . По этой причине изменение уровня h приводит к существенному изменению электрической ёмкости преобразователя. Для измерения ёмкости обычно используют мосты переменного тока.

В случае измерения уровня электропроводных сред используются изолированные стержневые электроды. Ёмкостные уровнемеры имеют высокую чувствительность к неизмеряемым (влияющим) величинам, таким как влажность материала и воздуха, температура окружающей среды. Поэтому в основном их используют для сигнализации предельных значений уровня. В случае невозможности использования стержневых ёмкостных преобразователей из-за конструктивных особенностей резервуаров (например, при наличии мешалок), применяют плоские датчики, которые имеют электроды, расположенные в одной плоскости (планарные). Такие преобразователи размещают на вертикальных стенках резервуаров, на высоте, соответствующей предельному значению уровня материала.

2.6. КОНДУКТОМЕТРИЧЕСКИЕ (ОМИЧЕСКИЕ) ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

Принцип действия *омических сигнализаторов* основан на замыкании электрической цепи источника питания через контролирующую среду, представляющую собой участок электрической цепи, обладающей определённым омическим сопротивлением (растворы кислот и щёлочей). Практически омические сигнализаторы уровня могут быть применены для сред с проводимостью от $2 \cdot 10^{-3}$ См и выше. Прибор представляет собой электромагнитное реле, которое включается в цепь, образуемую между электродом и контролируемым материалом. Схемы включения релейного сигнализатора (рис. 2.7) уровня могут быть различны в зависимости от типа объекта и числа контролируемых уровней. Недостатком таких преобразователей является невозможность сигнализации уровня неэлектропроводных сред, а также окисление поверхности электродов, что влечёт за собой увеличение контактного электрического сопротивления и потерю работоспособности преобразователей.

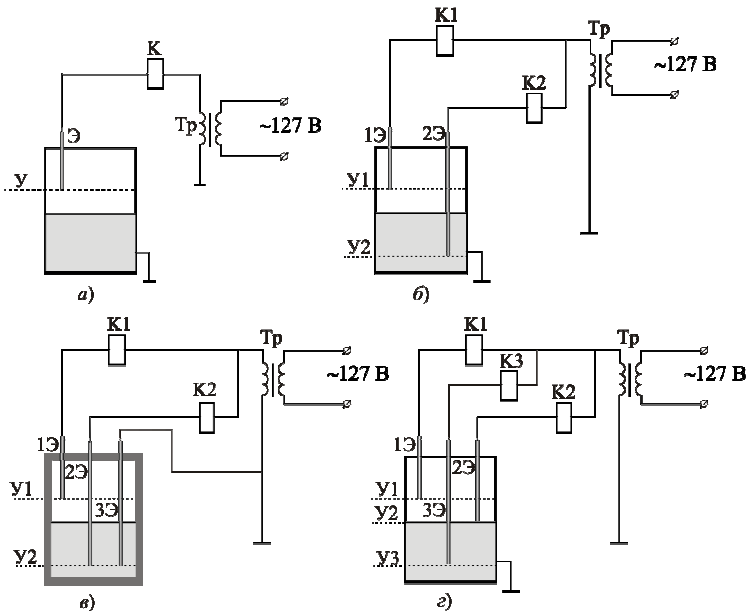


Рис. 2.7. Схемы включения омического релейного сигнализатора уровня:

- а* – для контроля одного уровня; *б* – для контроля двух уровней;
- в* – для контроля двух уровней в ёмкости из изоляционного материала;
- з* – для контроля трёх уровней; У – уровень; Э – электрод; К – реле;

Тр – трансформатор

2.7. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ УРОВНЯ ПО ВРЕМЕНИ ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛА

Методы, основанные на измерении времени прохождения сигнала, используют принцип эхолота и подразделяются на две основные группы: ультразвуковые (УЗК) и методы направленного электромагнитного излучения.

При известной скорости распространения импульса и измеренном временном интервале можно вычислить расстояние, пройденное импульсом. Необходимо учитывать, что импульс проходит расстояние между излучателем и поверхностью контролируемой среды дважды.

Ультразвуковые датчики уровня

Ультразвуковые уровнемеры (рис. 2.8) находят применение в технологических процессах, связанных с использованием токсичных и взрывоопасных сред, а также сред, находящихся в условиях высоких температур и давлений.

Действие средств измерения и контроля уровня этого типа основано на свойстве ультразвуковых колебаний проникать через металлические стенки резервуаров практически любой толщины и отражаться от границ раздела сред. Это свойство реализуется в двух вариантах.

В первом варианте используется способ отражения ультразвуковой волны от границы раздела воздух–жидкость со стороны воздуха. Во втором варианте используется способ отражения импульсных сигналов от границы жидкость–воздух со стороны жидкости.

Мерой уровня жидкости X является время прохождения ультразвука от пьезоэлектрического преобразователя I до границы и обратно.

Химические и физические свойства среды не влияют на результат измерения, полученный УЗК-методом, поэтому измерения уровня могут проводиться в агрессивных, абразивных, вязких и клейких средах. Однако необходимо помнить, что на скорость распространения ультразвука оказывает влияние температура и давление воздуха в среде его

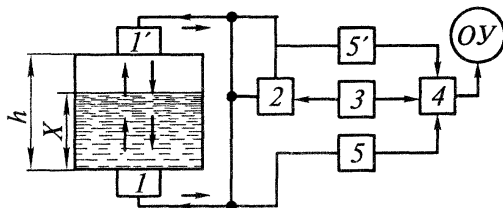


Рис. 2.8. Принципиальная схема ультразвукового уровнемера:

I и I' – пьезоэлектрический преобразователь; 2 – генератор импульсов;
3 – генератор пакетов; 4 – схема измерения; 5' и 5 – приёмники-усилители

распространения. С увеличением температуры и давления среды возрастает скорость распространения УЗК-сигнала. Для реализации обоих методов пьезоэлектрический преобразователь I' или I устанавливают в верхней или в нижней части резервуара. Преобразователь посылает пучок импульсов в пространство над жидкостью (или в жидкость). Отражённый от жидкой (газовой) границы сигнал воспринимается тем же преобразователем.

Электрические сигналы, подаваемые на пьезоэлектрический преобразователь I' или I формируются высокочастотным генератором импульсов 2. Для формирования кратковременного пучка импульсов служит генератор пакетов 3, который одновременно управляет генератором импульсов 2 и схемой измерения 4. Выходной сигнал, подаваемый на указатель ОУ, формируется путём автоматического слежения за длительностью сигнала t – времени распространения пучка от излучателя до поверхности раздела и обратно. Поскольку пьезоэлектрические преобразователи I' и I работают в режиме излучения–приёма, после подачи пучка импульсов они же начинают приём отражённых сигналов. Так как скорость звука зависит от температуры воздуха, то для возникающих температурных погрешностей при измерении уровня жидкости применяют температурную компенсацию.

Ультразвуковые измерители уровня имеют диапазон измерения 1...15 м при погрешности, не превышающей 2,5%.

Основные достоинства УЗК-метода:

- бесконтактный;
- применим для загрязнённых жидкостей;
- реализация метода не предъявляет высоких требований к износостойкости и прочности оборудования;
- независимость от плотности исследуемой среды.

Недостатки:

- большое расхождение конуса излучения;
- отражения от нестационарных препятствий (например, мешалок) могут вызвать ошибки измерения;
- применим только в резервуарах с нормальным атмосферным давлением;
- на сигнал оказывают влияние пыль, пар, газовые смеси и пена.

Радарные уровнемеры реализуют метод направленного электромагнитного излучения.



Рис. 2.9. Датчик радарного уровнемера Rosemount 5400 производства ПГ «Метран»

Датчик уровнемера монтируется при помощи фланца 2 на крышке ёмкости, в которой измеряется уровень жидкости. Принцип действия основан на измерении времени прохождения излучённого импульса электромагнитной волны частотой 6...26 ГГц от антенны 1 (рис. 2.9) до поверхности контролируемой среды и обратно. Это время зависит от уровня жидкости и преобразуется датчиком в унифицированный токовый сигнал 4...20 мА, или цифровой сигнал стандарта HART, что позволяет его использовать в автоматических системах контроля любой сложности. Датчик является интеллектуальным, что означает присутствие в нём микропроцессора и наличие возможности конфигурирования метрологических характеристик для конкретной измерительной задачи. В корпусе датчика имеется дисплей 3, на котором отображается информация, позволяющая диагностировать неисправности датчика. Используемая технология обработки измерительной информации в микропроцессоре датчика позволяет уменьшить влияние неоднородности поверхности контролируемой среды и загрязнения антенны.

Радарный уровнемер Rosemount серии 5600 (рис. 2.10) представляет собой сложный интеллектуальный прибор нового поколения, предназначенный для бесконтактных измерений уровня разных сред в резервуарах любого типа. Рекомендуется для измерений уровня сырой нефти, нефтепродуктов и других жидких, пастообразных, сыпучих материалов и продуктов. Уровнемер может использоваться как для автономной эксплуатации, так и для работы в составе различных автоматизированных систем управления.

В основу работы уровнемеров 5600 положен принцип бесконтактного радиолокационного измерения расстояния до уровня раздела сред: воздушная среда–контролируемый продукт, в процессе работы датчик контактирует с парогазовой составляющей внутреннего объёма резер-



Рис. 2.10. Датчик радиолокационного уровнемера

вуара, а не с продуктом. Принцип измерений (см. рис. 2.10), реализованный в уровнемерах 5600, основан на методе линейного частотно-модулированного непрерывного излучения, который в настоящее время широко применяется в высокоточных радиолокационных уровнемерах, предназначенных для работы в системах коммерческого учёта.

Излученная антенной радиоволна отражается от поверхности продукта и через определённое время, зависящее от скорости распространения и расстояния до поверхности продукта, вновь попадает в антенну.

В результате преобразования на выходе датчика формируется сигнал, частота которого равна разности частот принятого и излучённого сигналов (рис. 2.11).

По разности частот определяется расстояние до продукта, а затем вычисляется уровень наполнения резервуара. Используемая радарная технология позволяет применить к обработке сигнала средства спектрального анализа, обеспечивающие высокоэффективное подавление паразитных отражений, а также помех, связанных с волнением поверхности измеряемого продукта и загрязнениями антенны датчика уровня. Таким образом, можно с высокой точностью вычислить расстояние до продукта и уровень продукта в резервуаре.

Простой принцип действия, гибкость установки соответствующего оборудования и отсутствие необходимости в его обслуживании, а также относительно низкая стоимость являются важными факторами в пользу широкого применения метода.

Основные достоинства метода направленного электромагнитного излучения:

- надёжное измерение уровня порошкообразных материалов даже в процессе наполнения ёмкости;

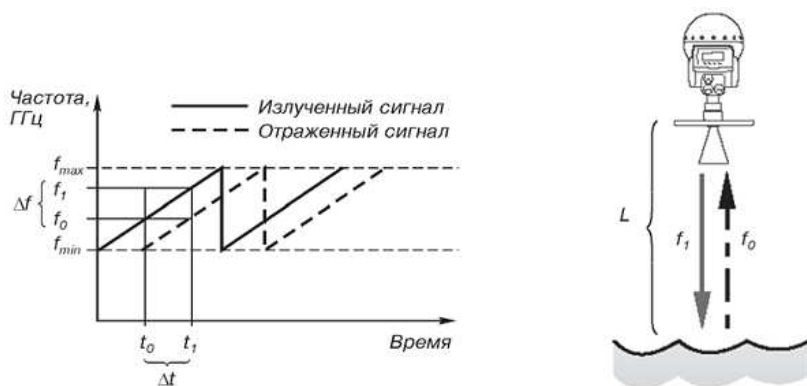


Рис. 2.11. Принцип работы уровнемера

- измерение уровня жидкостей при образовании пены в условиях повышения давления;
- возможность эффективного устранения помех отражения от арматуры (балок, укосин и т.д.) и структурных элементов стенок (например, гофрированных листов), резервуаров или узких силосных бункеров;
- независимость погрешности измерений от вида материала (жидкий, сыпучий), плотности, значения диэлектрической постоянной, химической агрессивности среды, проводимости, изменения свойств материала, вызванных процессом комкования;
- независимость метода от влияний таких факторов технологического процесса, как давление, температура, наличие подвижных поверхностей, пена, туман, пыль.

Недостатки:

- клейкие вещества могут вызвать отказы в работе датчиков;
- диэлектрическая постоянная измеряемого вещества должна быть больше 1,6. Чем выше диэлектрическая проницаемость, тем лучше отражение электромагнитной волны от поверхности.

2.8. МАГНИТНЫЕ ПОГРУЖНЫЕ ЗОНДЫ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ

Метод непрерывного измерения уровня основан на использовании магнитного погружного зонда. Постоянный магнит, смонтированный на поплавке зонда, вызывает срабатывание герметизированных магнитоуправляемых контактов (герконов), установленных на направляющей трубе. При срабатывании эти контакты включаются между последовательно включёнными резисторами внутри направляющей трубы; таким образом, при перемещениях поплавок общее значение сопротивления изменяется квазинепрерывно, в зависимости от разрешающей способности зонда. Точность измерения не зависит от электрических свойств среды, а также от давления, температуры и плотности.

Общие технические данные магнитных погружных зондов.

- Разрешающая способность: от 8 мм.
 - Допустимая температура контролируемой жидкости: $-20\dots+120$ °С.
 - Рабочее давление: до 3 бар (пластиковая модификация), до 16 бар (модификация из нержавеющей стали).
 - Плотность измеряемого вещества: не менее $0,6$ г/см³.
- Максимальная длина направляющей трубы: 3м.

Основные достоинства:

- простой принцип действия;
- несложный монтаж;

- минимальное техническое обслуживание;
- не требуется регулировка в месте установки.

Недостатки:

- подъёмная сила зависит от размера поплавка;
- фактическое положение уровня, соответствующее точке срабатывания, разное для веществ с различной плотностью;
- максимальная длина направляющей трубы не более 3м;
- минимальная плотность измеряемой среды равна $0,6 \text{ г/см}^3$;
- можно использовать только в очищенных жидкостях.

2.10. ИЗМЕРЕНИЕ УРОВНЯ СЫПУЧИХ ТЕЛ

Измерение уровня сыпучих тел имеет свои особенности. Характерным отличием сыпучих тел от жидких является непропорциональность передачи давления на дно и стенки в зависимости от уровня.

Свойство сыпучих материалов образовывать при насыпании угол естественного откоса позволило создать серию маятниковых приборов, работающих на принципе отклонения материалом чувствительного элемента с жёсткой или гибкой подвеской. На рис. 2.12 показан указатель предельного уровня сыпучего материала. При повышении в бункере 1 уровня сыпучего материала 2 с углом естественного откоса чувствительный элемент 3 отклоняется от вертикального положения и замыкает контактную систему 4 включения световой сигнализации 5. Общим недостатком всех указателей уровня маятникового типа является их зависимость от способа загрузки сосуда (бункера) материалом. Например, при беспорядочной загрузке, когда материал может обтекать маятник со всех сторон, может не произойти ожидаемого отклонения маятника.

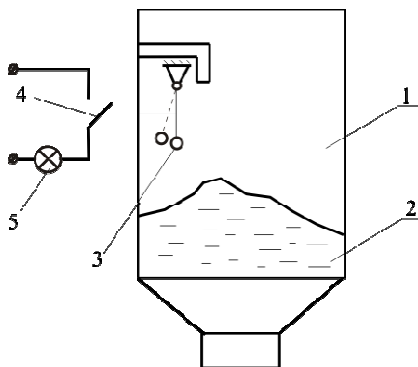


Рис. 2.12. Указатель уровня маятникового типа

В качестве первичного преобразователя уровнемера, работающего на весовом принципе (рис. 2.13) используется мессдоза. Чем выше уровень материала в бункере 2, размещённого на неподвижных опорах 1 и мессдозе 3, тем больше гидравлическое давление поршня на жидкость мессдозы, измеряемого манометром 4. Шкала манометра может быть проградуирована в единицах уровня.

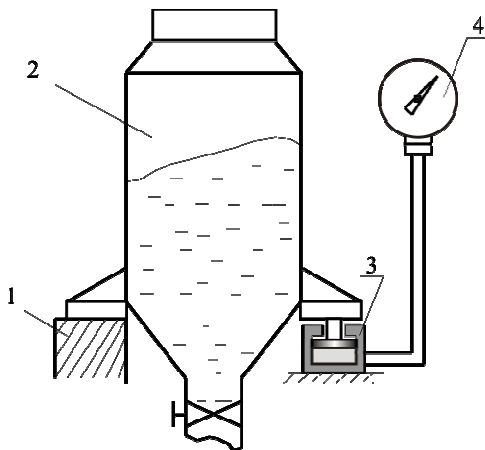


Рис. 2.13. Использование мессдозы для измерения уровня сыпучих материалов

Недостатком данного принципа измерения является перемещение опоры бункера 1...3 мм. Погрешность измерения достигает $\pm 10\%$.

Мембранный датчик уровня МДУ-3М

Мембранный датчик уровня МДУ-3М (рис. 2.14) состоит из корпуса 1 с крышкой 2 и штуцером 3 для подвода кабеля, гибкой резиновой мембраны 4, с элементом жёсткости 5, плоской пружины 6 и микровыключателя 7 типа МИ-3. Датчик МДУ-3М устанавливается на стенке ёмкости (бункера). При воздействии сыпучего материала на мембрану 4 она передаёт усилие на плоскую пружину и на шток микрорелепереключателя. Срабатывание микрорелепереключателя происходит при превышении уровня сыпучих материалов плотностью 800 кг/м^3 .

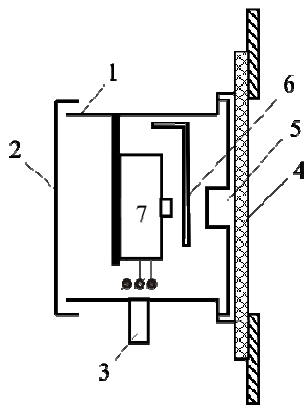


Рис. 2.14. Схема датчика уровня сыпучих материалов типа МДУ

3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Расходом вещества обычно называют количество вещества (массы или объёма), проходящее через определённое сечение канала (трубопровода) в единицу времени, а приборы или комплекты приборов, определяющие расход вещества в единицу времени, называют расходомерами. Расходомер может быть снабжён счётчиком (интегратором), показывающим массу или объём вещества, проходящего через прибор, за какой-либо промежуток времени.

Единицы измерения расхода могут быть объёмные – м³/ч, м³/мин, л/мин и т.д. и массовые – кг/ч, т/ч, и т.д.

В зависимости от принципа действия, наиболее часто применяемые в промышленности приборы для измерения расхода вещества, можно разделить на следующие группы.

Расходомеры переменного перепада давления, принцип действия которых основан на зависимости от расхода вещества перепада давления, создаваемого неподвижным устройством, устанавливаемым в трубопроводе. Наибольшее распространение из расходомеров переменного перепада давления получили расходомеры с сужающим устройством, работа которых основана на зависимости от расхода перепада давления, образующегося на сужающем устройстве в результате частичного перехода потенциальной энергии потока в кинетическую.

Расходомеры постоянного перепада давления, принцип действия которых основан на зависимости от расхода вещества вертикального перемещения тела (поплавка), изменяющего при этом площадь проходного отверстия прибора так, что перепад давления по обе стороны поплавка остаётся постоянным.

Электромагнитные (индукционные) расходомеры, принцип действия которых основан на измерении ЭДС, возникающей при движении электропроводной жидкости в магнитном поле.

Из расходомеров постоянного перепада давления наибольшее распространение получили:

ротаметры с поплавком, перемещающимся вдоль длинной конической трубки, характерными признаками большинства конструкций ротаметров является значительная длина трубки, обычно не менее чем в 10 раз превышающая его диаметр, и значительный ход поплавка, видимость поплавка или связанного с ним стержня;

поплавковые расходомеры с поплавком обычно конической формы, перемещающимся внутри отверстия.

Характерным признаком большинства конструкций поплавковых расходомеров является дистанционная (электрическая или пневматическая) передача положения поплавка, незначительный ход поплавка, обычно не превосходящий его диаметр.

Существует большое количество расходомеров, принцип действия которых основан на других зависимостях, например: тепловые, ультразвуковые, вихревые и др.

В зависимости от назначения и поставленных задач, системы измерения расхода, как и любые другие системы измерений, выполняют в виде последовательно или параллельно соединённых преобразователей, линий связи и измерительных приборов.

3.1. РАСХОДОМЕРЫ ПОСТОЯННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЙ (РОТАМЕТРЫ)

Ротаметры предназначены для измерения объёмного расхода плавно меняющихся однородных потоков чистых или слабозагрязнённых жидкостей и газов с дисперсными включениями.

Принцип действия ротаметров (стеклянных и металлических), основан на восприятии динамического давления потока измеряемой среды чувствительным элементом ротаметра – поплавком, помещённым в коническую трубу, по которой вверх проходит поток измеряемой среды.

При изменении положения поплавка проходное сечение между ним и внутренней стенкой конической трубы изменяется, что ведёт к изменению скорости потока в проходном сечении, а, следовательно, к изменению перепада давления на поплавке. Перемещение поплавка происходит до тех пор, пока перепад давлений не станет равным массе поплавка, приходящей на единицу площади его поперечного сечения. Каждому значению расхода среды, проходящему через ротаметр при определённой плотности и кинематической вязкости, соответствует вполне определённое положение поплавка. При этом перепад давлений ΔP под поплавком и над ним остаётся величиной постоянной и равной:

$$\Delta P \cong \frac{mg}{S} \cong \text{const} ,$$

где mg – сила тяжести, действующая на поплавок; S – площадь наибольшего поперечного сечения поплавка.

На заводе-изготовителе ротаметры градуируются по воде или воздуху. Для применения ротаметра на других средах требуется индивидуальная градуировка.

Ротаметры стеклянные (рис. 3.1) для местного измерения расхода конструктивно представляют собой вертикальную стеклянную трубу конического сечения 1 , вмонтированную в корпус расширяющимся концом вверх. Внутри трубы 1 находится поплавок 2 , перемещаемый вертикально потоком жидкости или газа, протекающим снизу вверх. Шкала прибора условная, в процентах, нанесена непосредственно на стеклянной трубке. Отсчёт показаний прибора производят по верхней острой кромке поплавка.

Некоторые поплавки имеют канавку в верхней части, вырезанную под углом. Благодаря этому происходит вращение поплавка, из-за чего его положение становится более устойчивым.

У ротаметров типа РМ поплавков изготовляется из стали Х18Н9Т, анодированного дюралюминия, титана или эбонита, в зависимости от пределов измерения. Материал деталей, соприкасающихся с измеряемой средой, у ротаметров РСС, предназначенных для измерения расхода агрессивных сред – фторопласт-4 и лабораторное стекло.

Ротаметры типов РС-3Е и РМ могут работать при температуре окружающей среды 5...50 °С и такой же температуре окружающего воздуха, ротаметры РСС – при температуре –40...+100 °С и окружающей среды –40...+40 °С. Нижний предел измерения составляет 20% верхнего. Основная погрешность $\pm 2,5\%$.

Ротаметры с электрической дистанционной передачей показаний типа РЭ являются бесшкальными преобразователями для измерения расхода жидкостей и преобразования его в выходной унифицированный сигнал. Градуировка ротаметров индивидуальная, производится заводом-изготовителем по воде при температуре воды и окружающего воздуха 20 ± 5 °С.

Ротаметры электрического типа РЭ бывают в двух исполнениях: РЭ – пылебрызгозащищённом; РЭВ – взрывозащищённом, предназначены для работы во взрывоопасных помещениях и имеют взрывозащиту ВЗГ (по градации ПИВЭ). Минимальный расход среды, который может быть надёжно измерен, составляет 20% максимального значения измеряемого расхода.

Конструктивно ротаметр (рис. 3.2) представляет собой стальной корпус с камерой, внутри которой имеется кольцевая диафрагма и поплавков со стержнем. В верхней части корпуса имеется направляющая трубка с насаженной на неё индукционной катушкой, закрытой кожухом. Под кожухом имеется регулировочная гайка, вращением которой производится перемещение индукционной катушки при градуировке ротаметра. На верхнем конце трубки закреплён плунжер индукционного датчика. Под действием потока измеряемого вещества поплавок перемещается вверх и увлекает за собой плунжер индукционного датчика. Перемещение плунжера приводит к разбалансу дифференциально-трансформаторной схемы, и на вторичный прибор поступает сигнал, пропорциональный измеряемому расходу.

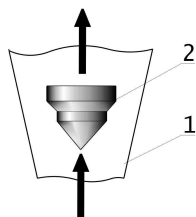


Рис. 3.1. Схема ротаметра с конической трубкой

В комплекте с ротаметрами электрическими в качестве вторичных приборов применяются приборы с дифференциально-трансформаторной системой передачи показаний.

Ротаметры с пневматической дистанционной передачей и местной шкалой показаний типов РП, РПО, ПРФ являются шкальными приборами для измерения расхода жидкостей и преобразования его в унифицированный пневматический выходной сигнал 0,02...0,1 МПа, передаваемый на вторичный прибор.

Перемещение сердечника в ротаметре, жёстко связанном с поплавком, через магнитную муфту и систему рычагов, позволяет получить местные показания, а также передаётся к управляющему элементу пневмодатчика, где преобразуется в пневматический сигнал. Значение этого сигнала передаётся на вторичный прибор и отражается перемещением стрелки на шкале прибора. Шкала прибора 100%-ная условная. Ротаметры градуируются заводом-изготовителем только по воде при нормальной температуре 20 ± 5 °С. В паспорте прибора помещаются кривые расхода по шкале и по пневмосигналу. Минимальный расход, измеряемый этими ротаметрами, равен 20% максимального. Питание приборов осуществляется сжатым воздухом, давлением 0,14 МПа. Присоединение приборов всех типов – фланцевое. Вторичный прибор может устанавливаться на расстоянии до 300 м от ротаметра.

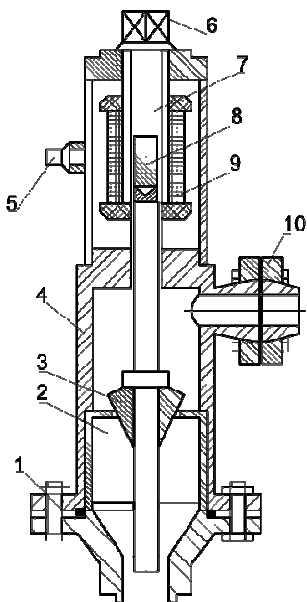


Рис. 3.2. Схема ротаметра электрического дистанционного РЭ:

- 1, 10 – входной и выходной штуцеры;
 2 – дисковое седло; 3 – конический поплавок;
 4 – корпус; 5 – штекерный разъём;
 6 – винт установки нуля; 7 – разделительная трубка; 8 – плунжер; 9 – дифференциально-трансформаторный преобразователь

При монтаже ротаметра следует предусмотреть обводную линию (**байпас**) с запорными вентилями для возможного отключения прибора без перекрытия потока жидкости в трубопроводе. Направление потока среды должно быть таким, чтобы она входила в вертикальный патрубок и выходила из горизонтального (ротаметры РЭ) и снизу вверх (ротаметры РС, РП, РПО). Ротаметры устанавливаются в строго вертикальном положении (по отвесу) во избежание заклинивания поплавка или штока возможно дальше от побудителей расхода.

Работы по наладке ротаметров состоят из индивидуального опробования и собственно наладки систем измерения. При наладке систем измерения расхода требуемую точность измерения проверяют сравнением показаний прибора систем измерения с непосредственными измерениями расхода или данными, полученными расчётом. При отклонениях показаний систем измерений от расчётных проверяют все элементы смонтированной схемы, включая линии связи, устраняют неисправности и повторно включают систему в работу.

Налаженные системы измерения в большинстве случаев проходят испытания на точную безаварийную работу в течение определённого времени, обычно не более трёх суток. В процессе испытаний проводятся эксплуатационные операции с приборами: контроль работы, смазка, продувка мест отбора импульсов, заправка чернилами и т.п.

3.2. РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО УРОВНЯ (ЦЕЛЕВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ)

Целевые расходомеры (дозаторы) используют для измерения расхода агрессивных, загрязнённых или многофазных жидкостей.

Целевые дозаторы предусмотрены для измерения расхода свободно протекающих жидкостей, их нельзя устанавливать на линиях под избыточным давлением. Дозаторы типов РМ и ДРЩ-Т выпускают на максимальные расходы до $50 \text{ м}^3/\text{ч}$, они имеют погрешность измерения расхода до 3% от номинального значения.

Дозаторы ДРЩ-Т (рис. 3.3) устанавливают в наивысшей точке трубопровода, по которому протекает жидкость без давления, в противном случае расход измеряемой среды не может быть измерен.

Корпус 1 должен быть установлен строго по уровню и отвесу, так как любое отклонение перегородки с профильной щелью 2 от вертикали вызовет погрешность в показаниях прибора, точность и линейность измерения которого определяются профилем щели и уровнем жидкости над нижней границей щели. Так как уровень измеряемой жидкости определяют с помощью пьезометрической трубки 3, то для регулирования расхода питающего воздуха должны быть предусмотрены регулятор расхода воздуха и ротаметр или другой расходомер. Питающая

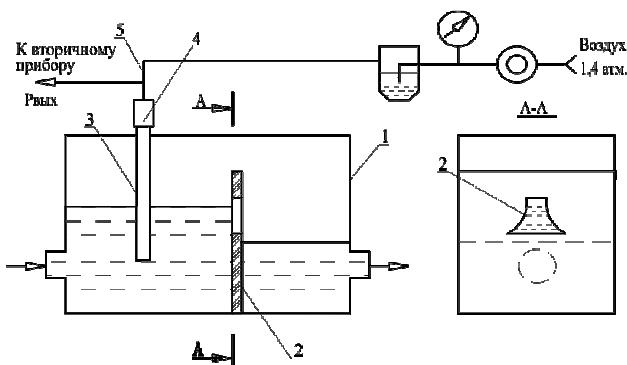


Рис. 3.3. Щелевой расходомер ДРЦ-Г (дозатор):

1 – корпус; 2 – профильная щель; 3 – пьезотрубка; 4 – регулировочная гайка; 5 – питающая линия

линия 5 должна быть врезана в систему измерения непосредственно в месте соединения пьезотрубки 3 прибора с измерительной трассой пневмопреобразователя.

3.3. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Принцип действия расходомера основан на явлении электромагнитной индукции (рис. 3.4).

Если электропроводная жидкость движется в магнитном поле, создаваемом электромагнитной системой 1, то между электродами 2 возникает ЭДС:

$$E = BvD ,$$

где B – индукция магнитного поля, создаваемого электромагнитной системой; v – средняя скорость потока жидкости; D – расстояние между электродами. Обычно B и D являются постоянными величинами, поэтому ЭДС E зависит только от средней скорости потока жидкости, а значит и объёмного расхода жидкости.

Достоинства электромагнитных расходомеров:

а) измерение не зависит от физических свойств жидкости (плотности, вязкости, удельной электрической проводимости – при условии, что она выше некоторой минимальной величины порядка нескольких мкСм/см);

б) измерение практически не зависит от распределения скорости в трубопроводе, что позволяет, в случае необходимости, размещать расходомер вблизи местных сопротивлений (колен, задвижек и т.п.);

в) в зоне измерений не происходит потери напора, так как сечение трубопровода ничем не загромождается;

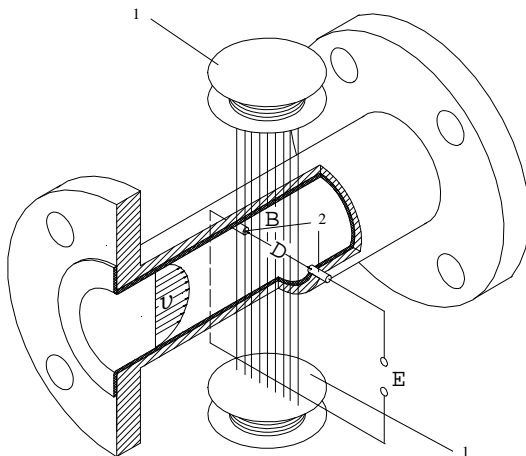


Рис. 3.4. Схема электромагнитного расходомера

г) отсутствие у расходомера подвижных изнашиваемых элементов;

д) коррозионная стойкость расходомера (например, в случае кислот), обеспечиваемая выбором соответствующего внутреннего покрытия (тефлон, эмаль, стекло) и материала электродов (титан, платина).

3.4. РАСХОДОМЕРЫ ПЕРЕМЕННОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ

Расходомеры переменного перепада давления, работающие по методу дросселирования потока, предназначены для измерения количества газов, жидкостей и водяного пара, проходящих по трубопроводам.

Принцип метода измерения заключается в том, что если трубопровод сузить в каком-либо месте, то часть потенциальной энергии потока переходит в кинетическую. Это сопровождается увеличением скорости потока в месте сужения и уменьшения давления за сужающим устройством.

Разность давления в сужающем устройстве зависит от количества проходящего по трубопроводу вещества и служит мерой его расхода.

В комплект расходомера входят: **сужающее устройство**, устанавливаемое на трубопроводе, дифференциальный манометр и вторичный прибор, записывающий и показывающий величину расхода газовых или жидкостных потоков. В некоторых случаях вторичный прибор суммирует количество измеряемого вещества.

На рисунке 3.5 показана схема измерения расхода методом дросселирования потока.

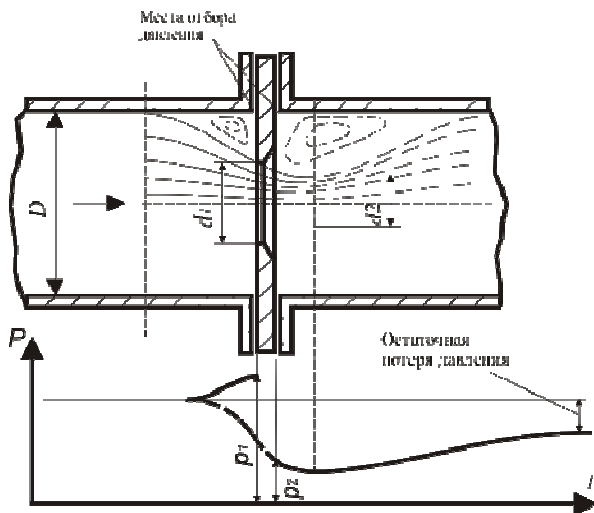


Рис. 3.5. Схема измерения расхода методом дросселирования потока

Расход вещества, соответствующий наибольшему перепаду давления ΔP (Н/м^2) в сужающем устройстве, рассчитывается по формулам:

$$Q_0 = \alpha F_0 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \text{ м}^3/\text{с};$$

$$Q_M = \alpha F_0 \sqrt{2\rho\Delta p}, \text{ кг/с},$$

где Q_0 – объёмный расход; Q_M – массовый расход; α – коэффициент расхода; F_0 – площадь отверстия сужающего устройства.

Коэффициент расхода газовых и жидкостных потоков α есть отношение действительного расхода к теоретически возможному, и учитывает сопротивление потоку, оказываемое трубопроводом и сужающим устройством. Определяется коэффициент расхода по экспериментальным данным, теоретически он вычислен быть не может. Величина коэффициента расхода определяется многими факторами, а именно: конструкцией дроссельного устройства, значением критерия Рейнольдса, состоянием поверхности (шероховатостью) дроссельного устройства и трубопровода, свойствами протекающей жидкости и отношением диаметра отверстия в дроссельном устройстве к диаметру трубопровода. Это отношение характеризуется числом $m = (d_1/D)^2$, которое называется модулем сужающего устройства.

Число Рейнольдса Re определяется режимом течения жидкости или газа. В зависимости от режима различают **ламинарное течение** и **турбулентное течение**. Оно является безразмерным числом, зависящим от скорости потока v , вязкости m и плотности жидкости ρ и характерной длины элемента потока L , т.е. $Re = \rho v L / m$.

Влияние числа Рейнольдса на коэффициент расхода сказывается только до некоторого его предельного значения $Re_{пред}$, выше которого α перестаёт зависеть от него и остаётся постоянным. Поэтому при измерении расхода необходимо, чтобы действительное значение числа Рейнольдса при данном расходе было выше предельного.

Основные типы сужающих устройств и их характеристики

Сужающие устройства делятся на нормальные и ненормализованные. К нормальным сужающим устройствам относятся дисковые диафрагмы, сопла и трубы Вентури. Для них справедливы табличные значения коэффициента расхода α , модуля m и числа Рейнольдса предельного $Re_{пред}$.

Нормальные сужающие устройства удовлетворяют требованиям Правил 28-64 по измерению расхода жидкостей, газов и паров.

К ненормализованным (специальным) сужающим устройствам относятся устройства индивидуального изготовления, сдвоенные и сегментные диафрагмы, сопла с профилем четверти круга, диафрагмы с двойным скосом и др. Эти сужающие устройства применяются при особых случаях измерения расхода. Например, сдвоенные диафрагмы применяются для измерения расхода при малой линейной скорости потока, сегментные – при измерении расхода газов и жидкостей, содержащих взвешенные частицы. В отличие от нормальных сужающих устройств они требуют индивидуальную градуировку для тех пределов значений Re , при которых каждое из них будет применяться.

Сужающие устройства необходимо выбирать на основании следующих положений:

а) нормальные диафрагмы применяются для трубопроводов диаметром $D \geq 0,05$ м; допустимый модуль диафрагмы лежит в пределах $0,05 \leq m \leq 0,7$;

б) сопла рекомендуется устанавливать для трубопроводов диаметром $D \leq 0,2$ м при измерении расхода газа, перегретого пара или агрессивных жидкостей и газов, если $m \leq 0,6$;

в) трубы Вентури устанавливают в тех случаях, когда требуется повышенная точность измерения и когда величина остаточной потери давления имеет решающее значение.

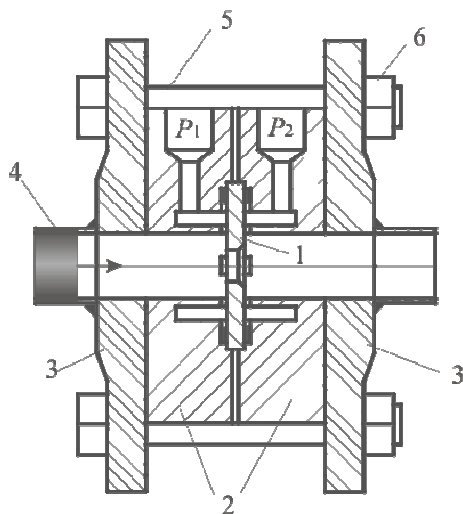


Рис. 3.6. Устройство камерной диафрагмы

Диафрагмы. **Нормальная диафрагма** представляет собой тонкий металлический диск *1*, имеющий круглое отверстие, расположенное концентрично оси трубы, с прямоугольной кромкой на стороне входа и со скосом на стороне выхода (при значительной толщине диска диафрагмы). Поток входит в цилиндрическую часть отверстия. Отбор давлений до и после диафрагмы осуществляется, как правило, при помощи кольцевых камер *2*, как показано на рис. 3.6. В этом случае сужающее устройство называется **камерной диафрагмой**. В трубопровод кольцевые камеры вместе с диафрагмой устанавливаются с использованием фланцев *3*, соединённых при помощи болтов или шпилек *5* и гаек *6*. Трубы *4* соединяются с фланцами при помощи сварки. Кольцевые камеры позволяют несколько сгладить случайные изменения давления до и после сужающего устройства.

Толщина диска диафрагмы не должна превышать $0,05 D_{20}$. Наименьшая толщина диафрагмы при передаче давления $\Delta P \geq 15696 \text{ Н/м}^2$ (1600 кгс/м^2) определяется расчётным путём, исходя из условий механической прочности диска.

В трубопроводах диаметром более $0,4 \text{ м}$ диафрагмы могут быть установлены без кольцевых камер *2*.

При отборе перепада давления через отдельные отверстия без кольцевых камер диаметр отверстий должен быть $0,03 D_{20}$, но не менее $0,04 \text{ м}$ и не более $0,015 \text{ м}$, а при измерении расхода влажного газа – не менее $0,008 \text{ м}$ и не более $0,015 \text{ м}$.

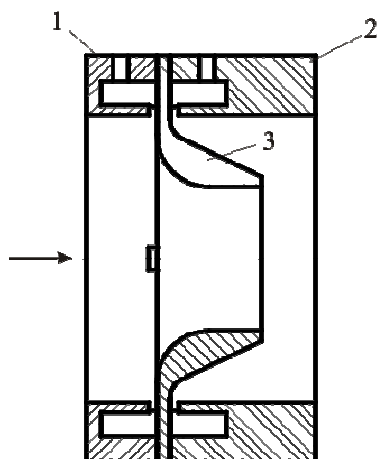


Рис. 3.7. Нормальное сопло (стрелкой указано направление потока)

В случае больших трубопроводов диаметром более 0,5 м отбор давления по сторонам диафрагмы производится через четыре и более пар отверстий по периметру трубопровода, соединяющих полости трубопровода с двумя усредняющими кольцевыми трубками, от которых импульсные трубки отходят к дифманометру.

Сопло. Устройство сопла показано на рис. 3.7. Давление потока перед соплом и после него отбирается обычно при помощи кольцевых камер 1 и 2. Сопло 3 состоит из профильной входной части, цилиндрической средней части и выходного конуса. Так как сужение потока происходит плавно, то зоны вихрей перед соплом не возникают. Это приводит к меньшей потере давления в потоке за сужением по сравнению с диафрагмой. Сопло, для которого известно значение коэффициента расхода α , называется **нормальным соплом**

Значительно более низкая стоимость изготовления диафрагм обусловливает их преимущественное применение в качестве сужающих устройств при измерениях расхода. Однако сопла также имеют некоторые важные преимущества:

а) в процессе эксплуатации в результате коррозии и оседания загрязнений входная кромка диафрагмы скругляется и приобретает форму входного профиля сопла. Коэффициент сжатия струи и коэффициент расхода диафрагмы увеличиваются. В соплах так же как и в диафрагмах, загрязняющие среду частицы оседают на входе, однако основная выходная часть сопла остаётся длительное время чистой. В отличие от диафрагм по мере загрязнения входных отверстий сопел коэффициент расхода сопла уменьшается;

б) основные конструктивные размеры сопел в отличие от размеров диафрагмы определяются кратными значениями D или d_1 , что соответствует требованиям геометрического подобия; основные размеры диафрагм (угол скоса кромки и длина цилиндрической части) не могут отвечать указанному требованию;

в) перепады давления, возникающие в соплах и диафрагмах, при одинаковых расходах и соотношениях размеров проходных сечений обратно пропорциональны квадрату коэффициента расхода, так что перепад давлений на соплах при одинаковом значении m составляет лишь 40% перепада давления на диафрагме. Именно поэтому сопла применяют для измерений таких расходов, при которых соотношение размеров сечений диафрагм при заданном измерителе перепада давления оказывается слишком большим, например, при измерении расхода, пара высокого давления, когда вследствие необходимости экономии дорогостоящих материалов применяют трубопроводы малого диаметра и допускают высокие скорости протекания пара.

Труба Вентури. Устройство трубы Вентури показано на рис. 3.8. Она применяется для труб диаметром 0,1...0,8 м при условии: $0,2 \leq m \leq 0,5$.

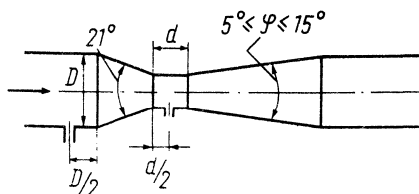


Рис. 3.8. Нормальная труба Вентури

Угол входного конуса равен 21° , угол выходного конуса должен удовлетворять условию: $5^\circ \leq \varphi \leq 15^\circ$.

Отбор статических давлений осуществляется не менее, чем шестью отверстиями через кольцевые камеры. Отверстия располагаются на расстоянии $D/2$ и $d/2$ от начала и конца входного конуса, их диаметр $d \geq 0,003$ м.

Трубы Вентури сложнее изготовить, они имеют значительные габариты, однако их следует применять в тех случаях, когда предъявляются жёсткие требования к минимизации остаточных потерь давления.

3.5. КАРИОЛИСОВЫ РАСХОДОМЕРЫ

Законами механики установлено, что на массу m , движущуюся со скоростью v относительно системы отсчёта, находящейся во враща-

тельном движении с угловой скоростью Ω , действует сила f_c , называемая силой Кориолиса и описываемая формулой

$$f_c = 2m[\Omega \times v].$$

Эта закономерность является основой принципа действия расходомеров, схема датчика которых показана на рис. 3.9.

Жидкость, массовый расход Q которой необходимо измерить, течёт со скоростью v через измерительную трубку U-образной формы (рис. 3.9). Трубку приводят в колебательное движение относительно оси OO' , перпендикулярной рукавам U-образной трубки; мгновенная угловая скорость трубки равна Ω . При отсутствии расхода жидкости оба рукава трубки колеблются синфазно, т.е. угол θ поворота трубки равен нулю. При ненулевом расходе жидкости возникает сила Кориолиса, которая действует на рукава трубки в разных направлениях, так как жидкость течёт в них в разные стороны.

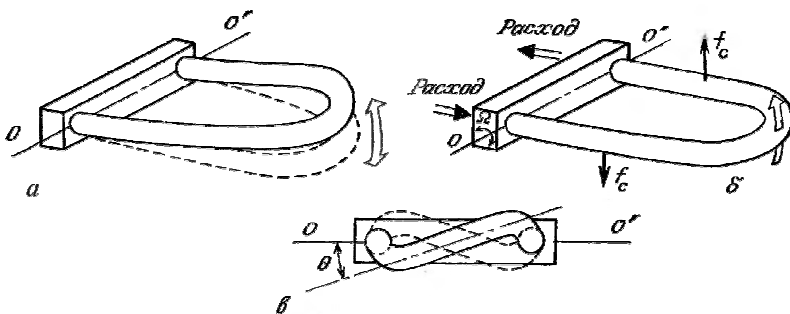


Рис. 3.9. Чувствительный элемент кориолисовых расходомеров:

a – при отсутствии расхода; *б* – при наличии расхода;

в – вид на чувствительный элемент спереди при наличии расхода

В результате рукава колеблются со сдвигом по фазе. Величину этого сдвига можно определить по сигналам преобразователей перемещения, укрепленных на рукавах трубки. В расходомере Метран-360 для этой цели применяют индуктивные преобразователи перемещений. А в качестве устройства возбуждения колебаний применяют электромагнит переменного тока. Колебания трубки происходят на её собственной частоте, которая зависит от массы трубки вместе с находящейся в ней жидкостью. Так как объём трубки всегда постоянный, то масса трубки однозначно зависит от плотности заполняющей её среды. Таким образом, по частоте колебаний трубки можно определить плотность, находящейся в ней жидкости.

Погрешность измерения расхода составляет 0,25%. Абсолютная погрешность измерения плотности составляет $\pm 2 \dots 3 \text{ кг/м}^3$.

Недостатком таких расходомеров является высокая стоимость. В России одним из основных производителей расходомеров подобного типа являются предприятия ПГ «Метран». На рис. 3.10 показан внешний вид современного кариолисового расходомера Метран-360.



Рис. 3.10. Внешний вид кариолисового расходомера Метран-360

3.6. ВИХРЕВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Вихревой расходомер – это расходомер, основанный на зависимости от расхода частоты образования вихрей, возникающих в потоке в процессе обтекания тела.

Когда поток жидкости обтекает тело, слои жидкости, прилегающие к поверхности тела, замедляются. Для обтекаемого тела эти пограничные слои следуют за контуром тела до места их встречи за объектом. В этом случае в потоке возникают небольшие возмущения. Для плохо обтекаемых тел пограничные слои отрываются от тела намного раньше и создают большие возмущения в потоке. Когда пограничный слой отходит от поверхности тела, он закручивается в вихри. Эти вихри, называемые **вихрями Кармана**, генерируются попеременно с верхней и нижней поверхности тела (рис. 3.11). В результате возникают два параллельных ряда вихрей, движущихся вниз по потоку с одинаковым расстоянием между вихрями в каждом ряду. Количество вихрей, генерируемое в секунду f от каждой стороны поверхности обтекаемого тела, можно определить как

$$f = \frac{Sv_s}{d},$$

где v_s – средняя скорость жидкости вблизи плохо обтекаемого тела; S – фактически постоянная величина, называемая числом Струхали. Поток жидкости у тела протекает через площадь, равную

$$(\pi D^2/4) - F_d,$$

где D – диаметр трубы. Предполагается, что тело имеет прямоугольную поверхность поперечного сечения шириной d , расположенную в диаметральной плоскости трубы, и его эффективная площадь равна примерно F_d . Скорость v_s в этом месте определяется скоростью v на некотором удалении от тела, и объёмный расход Q может быть определен как

$$Q = (\pi D^2/4)v = (\pi D^2/4 - F_d)v_s,$$

следовательно

$$f = \frac{SD^2v}{\pi D^2 - F_d} = \frac{SD^2Q}{(\pi D^2/4)(\pi D^2/4 - F_d)} = \frac{4SQ}{\pi D^2 d [1 - (4d/\pi D)]}.$$

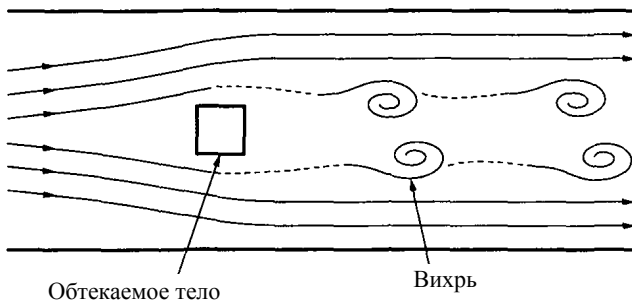


Рис. 3.11. Образование вихрей

Имеется много методов для измерения частоты вихрей. Например, можно измерять давление потока за обтекаемым телом. При возникновении вихря статическое давление уменьшается. Таким образом, по частоте изменения давления, измеряемым кварцевым пьезоэлементом, можно судить о частоте вихрей, а значит и о расходе вещества. В другом методе вихри оказывают воздействие на луч ультразвуковой волны. Этот метод реализован в вихреакустических расходомерах (рис. 3.12). Преобразователь в этом случае представляет собой моноблочную конструкцию, состоящую из проточной части и электронного блока. В корпусе проточной части расположены: тело обтекания призма трапециевидного сечения 1, пьезоизлучатели (ПИ) 2, пьезоприёмники (ПП) 3 и термодатчик 7.

Электронный блок включает в себя генератор 4, фазовый детектор 5, микропроцессорный адаптивный фильтр с блоком формирования выходных сигналов 6, смонтированные на печатной плате.

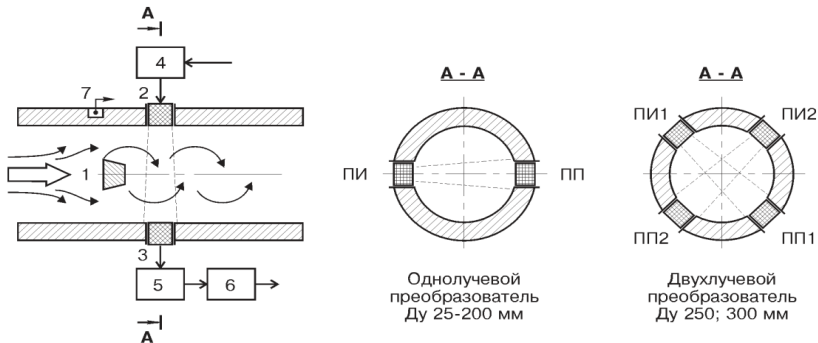


Рис. 3.12. Вихреакустические расходомеры

Тело обтекания (ТО) установлено на входе жидкости в проточную часть. При обтекании ТО потоком жидкости за ним образуется вихревая дорожка, частота следования вихрей в которой с высокой точностью пропорциональна скорости потока, а, следовательно, и расходу. За ТО в корпусе проточной части диаметрально противоположно друг другу установлены стаканчики, в которых собраны ультразвуковой пьезоизлучатель (ПИ) и пьезоприёмник (ПП).

В зависимости от типа, преобразователи имеют два конструктивных исполнения:

- 1) однолучевые преобразователи – одна пара ПИ, ПП (Ду 25-200 мм);
- 2) двухлучевые преобразователи – две пары ПИ, ПП (Ду 250-300 мм).

От генератора на ПИ подаётся переменное напряжение, которое преобразуется в ультразвуковые колебания. При прохождении через поток, в результате взаимодействия с вихрями, ультразвуковые колебания модулируются по фазе. На ПП модулированные ультразвуковые колебания вновь преобразуются в напряжение, которое подаётся на фазовый детектор. На фазовом детекторе определяется разность фаз между: сигналами с ПП и опорного генератора для однолучевых преобразователей.

Напряжение на выходе фазового детектора по частоте и амплитуде соответствует частоте и интенсивности следования вихрей, которая, в силу пропорциональности скорости потока, является мерой расхода.

Вихревые расходомеры применяются и для жидкостей, и для газов. Они не чувствительны к изменениям плотности, температуры или

давления, имеют точность $\pm 1\%$ и используются при давлении до 10 МПа и температуре до 200 °С.

3.7. КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Этот метод предполагает, что в потоке жидкости существуют случайные флуктуации, такие как турбулентность, пузырьки или частицы. На рисунке 3.13 показан вариант такого прибора, когда средством определения флуктуации является ультразвук. Любые флуктуации, проходя между излучателем и приёмником, воздействуют на принимаемый сигнал, изменяя его амплитуду и фазу. Сигналы, принимаемые двумя приёмниками, после усиления и фильтрации поступают на коррелятор. В идеальном случае эти сигналы имеют одинаковую форму, но смещены на величину времени протекания t_n потока по измерительному участку длиной L . Искусственная задержка сигнала первого приёмника на время τ может обеспечить совпадение обоих сигналов. Коррелятор должен обеспечить такое время задержки τ , чтобы $\tau = t_n$ и таким образом, задержанный протеканием потока по измерительному участку сигнал второго приёмника $u_2(t)$ был равен искусственно задержанному сигналу первого датчика $u_1(t - \tau)$:

$$u_2(t) = u_1(t - \tau).$$

Коррелятор обеспечивает выполнение следующих измерительных операций:

- занесение сигналов при заданном времени опроса обоих датчиков $u_1(t)$ и $u_2(t)$ в блок памяти в виде цифровых значений их амплитуд, а также шаговое вычисление коэффициента корреляции $r_{xy}(\tau)$ для возможного в заданном диапазоне измерения времени пробега

$$r_{xy} = \sum u_1(t)u_2(t - \tau);$$

- определение времени задержки τ_{\max} , при котором коэффициент корреляции наибольший;
- определение по известному расстоянию между датчиками L и при $t = \tau_{\max}$ скорости потока

$$v = L / \tau_{\max}.$$

При больших расстояниях между датчиками ошибка квантования при определении времени пробега, вызываемая сканированием амплитуд их сигналов, настолько мала, что ей можно пренебречь. С другой стороны, с увеличением времени пробега формы сигналов изменяются, и ухудшается подобие. Наименьшие, ещё надёжно детектируемые коэффициенты корреляции находятся примерно в зоне 10%, в которой корреляционная функция имеет настолько тупой максимум, что необходимо считаться со значительными отклонениями результатов вычислений, устраняемыми путём усреднения при фильтрации.

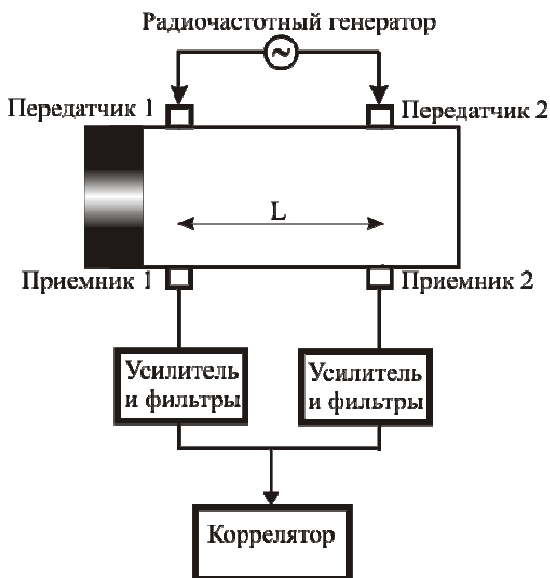


Рис. 3.13. Корреляционные расходомеры

Калибровка расходомеров, основанных на корреляционном принципе измерения, зависит только от геометрии участка трубопровода, на котором производится измерение, и не зависит от исходной величины сигналов датчиков. Так как размеры вводимых в трубопровод элементов малы, то они не препятствуют прохождению потока и не искажают его форму. Подвижных частей приборы не имеют.

Ошибки корреляционных расходомеров могут возникнуть также вследствие искажения формы сигналов, формируемых последовательно в разных точках потока и в разные моменты времени. Возможны также ошибки, вызываемые разной скоростью движения основной среды и находящихся в ней частиц, т. е. относительным перемещением последних. Как и при всех других способах определения расхода, путём измерения скорости потока, результат измерения зависит от распределения скоростей в поперечном сечении контролируемого потока.

Систематические и случайные ошибки измерения уменьшаются с возрастанием расстояния между приёмниками.

Корреляционные помехи, например, собственные шумы датчиков и перекрёстные помехи измерительных каналов, вызывают систематические ошибки; случайные ошибки вызываются только некоррелированными помехами. Правильное конструктивное выполнение приборов позволяет уменьшить помехи обоих видов.

Несмотря на то, что корреляционные методы измерения расходов давно известны, они применялись ранее только для решения узкоспециальных задач, так как были связаны со значительными затратами. Стремительное развитие микропроцессорной техники обеспечивает в настоящее время возможность выпуска корреляционных расходомеров, конкурентоспособных по своей стоимости.

3.8. УЛЬТРАЗВУКОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Принцип действия **временн**пульсных **ультразвуковых расходомеров** основан на временн

пульсном методе измерения расхода. При реализации этого метода ультразвуковые импульсы поочерёдно передаются вверх и вниз по течению потока. Разность времён распространения пропорциональна скорости течения потока.

В состав прибора входят (рис. 3.14):

- два первичных ультразвуковых преобразователя расхода, состоящих из двух пар пьезоэлектрических преобразователей (ПЭП), установленных на трубопроводе условным диаметром 15...1800 мм;
- вторичный преобразователь – электронный блок.

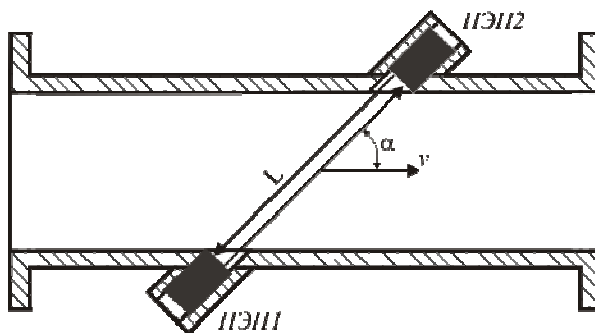


Рис. 3.14. Схема датчика ультразвукового расходомера

Пьезоэлектрические преобразователи ПЭП1 и ПЭП2 работают попеременно в режиме приёмник–излучатель.

Прямой цикл. Излучающий пьезопреобразователь под воздействием электрического возбуждения испускает плоскую ультразвуковую волну. Эта волна проходит сквозь поток жидкости и принимается приёмным пьезопреобразователем, который преобразует полученные акустические вибрации в электрические сигналы. Расходомер анализирует принятый сигнал и регистрирует точно измеренное время прохождения акустической волны от излучающего до приёмного преобразователя.

Обратный цикл. Последовательность передачи–приёма сигнала предыдущего цикла повторяется, но функции излучающего и приёмного преобразователей меняются местами. Таким образом, теперь поток жидкости пересекает ультразвуковую волну в противоположном направлении. Расходомер снова регистрирует точное время прохождения импульса.

Поток материала будет влиять на измеренное время прохождения точно так же, как ветер влияет на время полёта самолета, «подталкивая» его, или течение воды на скорость пловца.

Расходомер вычитает время прохождения обратного цикла из времени прохождения прямого цикла, и полученная в результате разность сигналов будет пропорциональна потоку движущейся жидкости.

Скорость распространения ультразвукового сигнала в среде, заполняющей трубопровод, представляет собой сумму скоростей ультразвука в неподвижной воде и скорости потока воды v в проекции на рассматриваемое направление распространения ультразвука. Время распространения ультразвукового импульса от ПЭП1 к ПЭП2 и от ПЭП2 к ПЭП1 зависит от скорости движения среды в соответствии с формулами (3.1) и (3.2):

$$t_1 = \frac{L}{C_0 + v \cos \alpha}, \quad (3.1)$$

$$t_2 = \frac{L}{C_0 - v \cos \alpha}, \quad (3.2)$$

где t_1, t_2 – время распространения ультразвукового импульса по потоку и против потока; L – длина активной части акустического канала; C_0 – скорость ультразвука в неподвижной среде; v – скорость движения воды в трубопроводе; α – угол в соответствии с рис. 3.14.

В приборе используется метод прямого измерения времени распространения каждого индивидуального ультразвукового импульса от одного ПЭП к другому.

Из формул (3.1) и (3.2) получаем

$$v = \frac{\Delta t c_0^2}{2L_A \cos \alpha}, \quad \Delta t = t_2 - t_1, \quad (3.3)$$

где Δt – разность времени распространения ультразвуковых импульсов по потоку и против потока.

Умножив среднюю скорость потока v на сечение трубопровода, получим значение расхода среды Q , протекающего на месте установки ПЭП

$$Q = \frac{\pi D^2 K}{4} \frac{\Delta t c_0^2}{2L_A \cos \alpha}, \quad (3.4)$$

где D – внутренний диаметр трубопровода на месте установки ПЭП;
 K – коэффициент коррекции.

Для обеспечения на всём диапазоне измерений погрешности $\pm 2\%$ необходимы специальные меры, требующие значительных затрат. В качестве источников ультразвуковых колебаний применимы пьезоэлектрические материалы (кварц, титанат бария, цирконат свинца). Диапазон применяемых частот 0,5...10 МГц. Для получения точности 1% на всём диапазоне, а также при очень малых скоростях потоков (0,1...0,5 м/с) следует выбирать способ измерения, обеспечивающий независимость результатов от скорости распространения ультразвука в данной среде или использовать схемы температурной компенсации, гарантирующие высокую точность.

3.9. ТЕПЛОВЫЕ РАСХОДОМЕРЫ

Тепловой расходомер основан на нагреве потока жидкости или газа посторонним источником энергии, создающим в потоке разность температур, зависящую от скорости потока и от расхода тепла в нагревателе. Разница температур между этими датчиками зависит от массового расхода. Как правило, расходомеры подобного типа состоят из двух температурных датчиков, один из которых смонтирован выше по потоку, а другой – ниже по потоку по отношению к нагревателю (рис. 3.16).

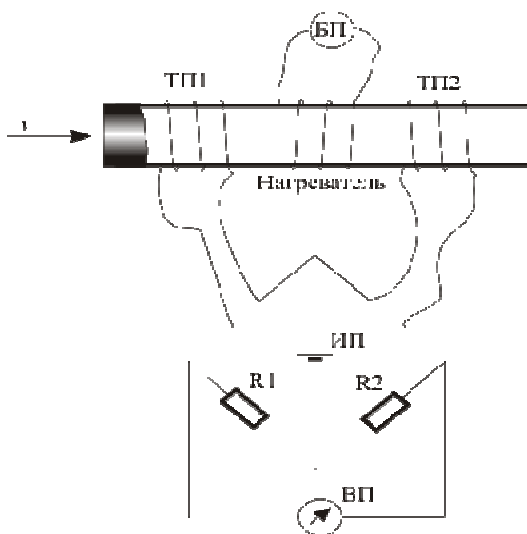


Рис. 3.16. Тепловой расходомер

Два датчика температуры включены в соседние плечи моста Уитстона. Если расход материала в трубопроводе равен нулю, то материал в трубопроводе разогревается симметрично относительно нагревателя, и сопротивления термопреобразователей ТП1 и ТП2 одинаковы. Мостовая схема уравновешена и показания вторичного прибора равны нулю. Как только возникает движение материала в трубопроводе, равновесие нарушается. Термопреобразователь ТП1 окажется более холодным, чем ТП2. Их сопротивления также будут различаться.

Разница потенциалов разбаланса моста является мерой разности температур и, следовательно, массового расхода жидкости. Такие приборы применяются для измерения малых расходов газовых потоков и жидкостей в диапазоне $2,5 \cdot 10^{-10}$ г/с... $5 \cdot 10^{-3}$ кг/с с точностью $\pm 1\%$. Для измерения больших расходов можно использовать байпасную (обводную) линию, геометрические параметры выбирают такими, чтобы расход через датчик составлял постоянную часть от общего расхода.

4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЙ

Параметрами механического движения (кроме перемещения), подлежащими измерению на практике, являются скорость и ускорение. Это кинематические параметры и они связаны между собой.

Параметры движения по характеру изменения во времени можно разбить на параметры поступательного, вращательного и колебательного движений.

Средства измерений и контроля, предназначенные для измерения линейных скоростей, называются измерителями скорости, средства для измерения и контроля угловых скоростей (частоты вращения) – **тахометрами**, а средства для измерения ускорений – **акселерометрами**. Большой класс средств измерений применяется для измерения параметров колебательного движения (вибраций). Если измеряются параметры вибраций машин, устройств, сооружений, то соответствующие средства называются **виброметрами**. Приборы, применяемые для измерения параметров движения земной поверхности, называются сейсмографами.

4.1. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ЛИНЕЙНЫХ СКОРОСТЕЙ

Наиболее распространённые методы измерения линейных скоростей движущихся твёрдых тел: аэрометрический, компенсационный, термодинамический, корреляционный, доплеровский, электромагнитный, инерциальный и др.

Аэрометрический метод (рис. 4.1, а) основан на измерении скоростного (динамического) напора, функционально связанного со скоростью тела, движущегося в воздушной среде.

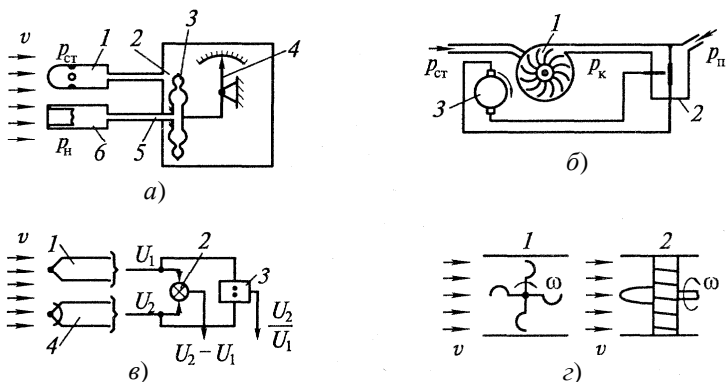


Рис. 4.1. Методы измерения и контроля линейных скоростей:

- а* – аэрометрический (1 – приёмник статического давления; 2 – корпус; 3 – манометрическая коробка; 4 – стрелка; 5 – трубопроводы; 6 – приёмник полного давления); *б* – компенсационный (1 – воздушный компрессор; 2 – манометрическое реле; 3 – двигатель); *в* – термодинамический (1 – открытая термопара; 2 – сумматор; 3 – делитель; 4 – экранированная термопара); *г* – турбинный (1 – тангенциальная турбинка; 2 – аксиальная турбинка)

Скоростной напор определяется манометрической коробкой 3 путём сравнения статического давления, образуемого при движении воздушной среды в приёмнике статического давления 1 и приёмнике полного давления 6. Результат сравнения показывается стрелкой 4 на отсчётном устройстве. Средства измерения, построенные на аэрометрическом методе, позволяют измерять скорость с погрешностью, не превышающей 2...3%.

Компенсационный метод (рис. 4.1, б) основан на автоматическом уравнивании полного давления p_n и давления p_k , развиваемым воздушным компрессором 1. В манометрическом реле 2 с двумя полостями, в одну из которых поступает полное давление p_n , а во вторую – давление p_k , p_n и p_k уравниваются. Замыкание цепи двигателя 3, приводящего во вращение компрессор, происходит тогда, когда давление p_n больше p_k . При этом мембрана манометрического реле 2 прогибается влево. При замыкании и размыкании контактов частота вращения электродвигателя поддерживается такой, при которой обеспечивается равенство p_n и p_k .

Термодинамический метод (рис. 4.1, в) основан на измерении температуры заторможенного потока воздушной среды с помощью открытой термопары 7 и экранированной термопары 4 (либо других преобразователей температуры). Разность сигналов этих термопар

улавливается сумматором 2 и делителем 3. Для реализации этого метода необходимы малоинерционные измерители температуры. Погрешности средств измерений скоростей по этому методу обусловлены непостоянством параметров преобразователей температуры (1 и 4).

В турбинном методе (рис. 4.1, з) используется кинетическая энергия воздушного или водного потока для вращения тангенциальной 1 или аксиальной 2 турбинки. Частота вращения турбинки ω будет пропорциональна скорости движения. Средства измерений в виде аксиальной турбинки нашли широкое применение при измерении скорости морских кораблей.

В последнее время всё чаще применяются *корреляционные измерительные устройства*, в частности, бесконтактный измеритель скорости проката, бумажного полотна или скорости движения транспортных средств. Схема измерителя приведена на рис. 4.2. За перемещаемым объектом следят два фотоприёмника 1 и 2, размещённые на расстоянии l друг от друга. Они воспринимают отражённый от движущегося объекта свет. Сигналы фотоприёмников усиливаются, фильтруются и преобразуются в цифровой вид блоками 3, после чего поступают в процессор, который выполняет функции коррелятора. При появлении нерегулярностей (окалины на ленте проката, цветного рисунка и т.д.) соответствующие пики выходного сигнала второго фотоприёмника оказываются сдвинутыми на интервал времени Δt относительно аналогичных выбросов выходного сигнала первого фотоприёмника. Интервал Δt определяется корреляционным методом, по взаимно-корреляционной функции $R(\tau)$, которая описывается интегральным выражением

$$R(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T u_1(t - \tau) u_2(t) dt.$$

Так как сигнал второго фотоприёмника отстаёт на интервал времени Δt , то можно записать, что $u_2(t) \cong u_1(t - \tau)$, т.е. сигналы u_1 и u_2 подобны по форме, а сигнал u_1 отстаёт во времени на величину транспортного запаздывания. Для определения $R(\tau)$ в корреляторе (вычислителе) сигнал u_1 последовательно задерживается блоком регулируемого запаздывания и умножается на сигнал u_2 , а их произведение интегрируется во времени. Выходным сигналом интегратора является взаимно-корреляционная функция. Эти операции выполняют до появления максимума функции, указывающего на то, что регулируемая задержка сигнала u_1 в корреляторе достигла значения Δt . Значение регулируемой задержки при этом известно. Средняя скорость движения контролируемого объекта v составляет $l/\Delta t$ и при постоянстве базы l равна обратному значению величины Δt .

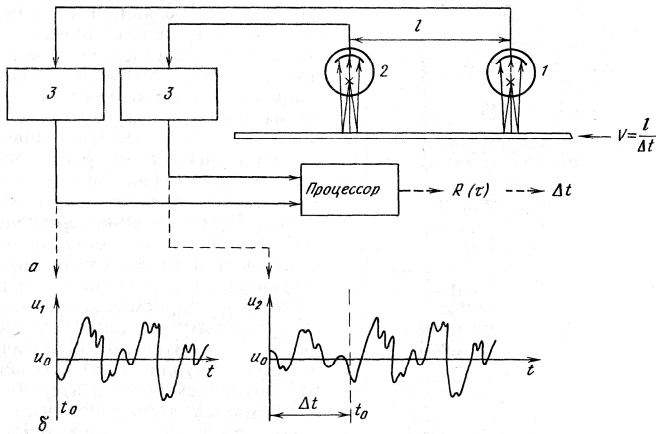


Рис. 4.2. Бесконтактный корреляционный измеритель скорости перемещения объекта:

а – функциональная схема измерителя скорости; *б* – зависимости сигналов фотоприёмников 1 и 2 от времени

Для измерения скоростей газовых потоков применяются **термоанемометры** – приборы, основанные на зависимости между количеством тепла, теряемым непрерывно нагреваемым или предварительно нагретым телом, и скоростью потока газа (редко жидкостью), в котором это тело находится. Таким образом, по температуре данного тела (например, нагреваемой током проволоочки, помещённой в поток газа (воздуха)) можно судить о скорости этого газа (воздуха). При скорости газа более 3 м/с чувствительность термоанемометров очень низкая, поэтому они пригодны для измерения только малых скоростей потоков воздуха, газов или жидкости.

Измерители скорости, работающие на использовании *эффекта Доплера*, имеют в своём составе радар, включающий в себя источник ультразвуковых колебаний с частотой f_0 , и приёмник ультразвуковых колебаний, отразившихся от движущегося со скоростью v объекта. Если объект приближается к радару, то частота колебаний f , отразившихся от него, будет больше первоначальной. Если наоборот, то частота будет меньше. Таким образом, по разности частот $(f - f_0)$ можно узнать о скорости объекта и о направлении его движения.

4.2. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ И КОНТРОЛЯ СКОРОСТЕЙ ВРАЩЕНИЯ

В настоящее время наиболее широкое распространение в технике получили следующие методы измерения и контроля скоростей враще-

ния: центробежные, магнитоиндукционные, электрические (постоянного и переменного тока), индукционные и стробоскопические.

Центробежный метод характерен тем, что чувствительный элемент реагирует на центробежную силу, развиваемую неуравновешенными массами вращающегося вала. Этот метод реализуется в коническом и кольцевом тахометрах.

В коническом тахометре (рис. 4.3, *a*) на шарнирах, вращающихся вместе с осью, установлены грузики *m*, которые под действием центробежных сил расходятся, перемещая вдоль оси муфту 1 и сжимая пружину 2. Изменение положения муфты 1 регистрируется показывающим элементом тахометра – стрелкой. В кольцевом тахометре (рис. 4.3, *б*) при невращающейся оси ($\omega = 0$) плоскость кольца наклонена по отношению к оси на определённый угол. При вращении кольцо стремится занять положение, перпендикулярное оси вращения, и вызывает перемещение муфты 1 и стрелки отсчётного устройства.

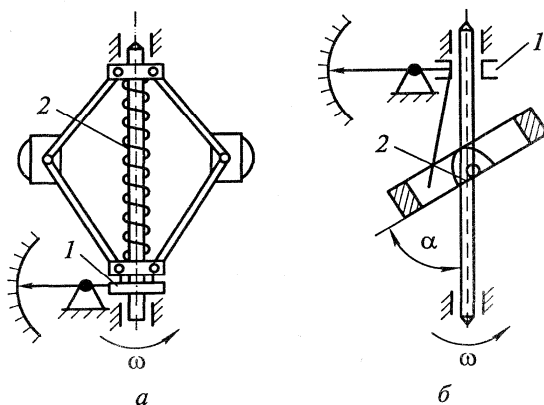


Рис. 4.3. Центробежные тахометры:

a – конический (1 – муфта; 2 – пружина); *б* – кольцевой (1 – муфта; 2 – ось)

Центробежные тахометры нередко применяются в качестве преобразователей в регуляторах частоты вращения. Недостатком этих средств измерения является отсутствие дистанционности, значительные погрешности и технологические трудности в изготовлении и регулировании.

Магнитоиндукционный метод основан на зависимости наводимых в металлическом теле вихревых токов от частоты вращения. Тахометры, построенные на этом методе, выполняются в двух вариантах: с цилиндрическим чувствительным элементом (рис. 4.4, *a*) и дисковым

чувствительным элементом (рис. 4.4, б). Основной частью магнитоиндукционного тахометра являются измерительный узел, который состоит из постоянного магнита 1 и чувствительного элемента 2, выполненного в виде полого цилиндра или диска. Обычно постоянный магнит имеет частоту вращения, которую необходимо измерить, а чувствительный элемент, выполненный из металла с большим удельным сопротивлением, удерживается от вращения спиральной пружиной. За счёт взаимодействия магнитных полей постоянного магнита и вихревых токов создаётся вращающий момент, вызывающий поворот чувствительного элемента на угол, зависящий от значения измеряемой скорости вращения. В целях уменьшения температурной погрешности от непостоянной магнитной индукции в зазоре применяют термомагнитный шунт 3.

Магнитоиндукционные тахометры выполняются со шкалами, проградуированными в с^{-1} (типа ТЭ) и с процентными шкалами (типа ИТЭ).

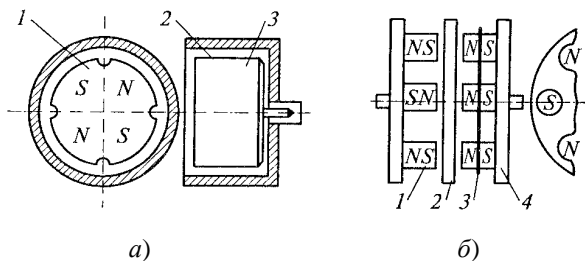


Рис. 4.4. Магнитоиндукционные тахометры:

a – с полым ротором; *б* – с диском; 1 – постоянный магнит; 2 – чувствительный элемент; 3 – термомагнитный шунт; 4 – магнитопровод

Электрический метод измерения основан на зависимости генерируемого напряжения от частоты вращения (для постоянного, переменного и импульсного тока), а для переменного и импульсного тока – на зависимости частоты тока от частоты вращения.

Электрические тахометры (рис. 4.5) включают в себя тахогенератор и гальванометр. Тахогенераторы бывают двух типов: с вращающимся постоянным магнитом и неподвижным постоянным магнитом.

Тахогенератор с вращающимся постоянным магнитом (см. рис. 4.5, *a*) выполняется с неподвижной статорной обмоткой, внутри которой помещается постоянный магнит, связанный с валом, скорость вращения которого измеряется. При вращении магнита и его магнитного поля индуцируется ЭДС в обмотках статора, пропорциональная скорости вращения. Такие тахогенераторы применяются в качестве преобразо-

вателей угловой скорости и скоростной обратной связи в системах управления. Достоинство такого тахогенератора – отсутствие коллектора и щёток.

Основными элементами тахогенератора, показанного на рис. 4.5, б являются постоянный магнит 1 с соответствующими магнитопроводами, обмотка якоря 2 и коллектор со щётками 3. Снимаемое с коллектора напряжение постоянного тока измеряется гальванометром.

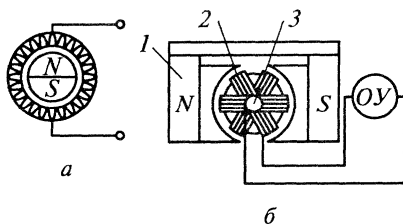


Рис. 4.5. Схемы электрических тахометров:

a – тахогенератора; *б* – тахогенератора постоянного тока;
 1 – постоянный магнит; 2 – обмотка якоря; 3 – коллектор со щётками;
 ОУ – отсчётное устройство вторичного прибора

В тахомерах переменного тока тахогенератор состоит из вращающегося короткозамкнутого ротора и двух статорных обмоток, витки которых расположены под углом 90° относительно друг друга. Измерение угловой скорости ω сводится к измерению частоты переменного тока, равной частоте вращения или к измерению амплитуды напряжения на индикаторной обмотке. Первый способ более предпочтителен, так как частота вращения равна частоте переменного тока.

Среди тахометров переменного тока особое место занимают индукционные тахометры (рис. 4.6).

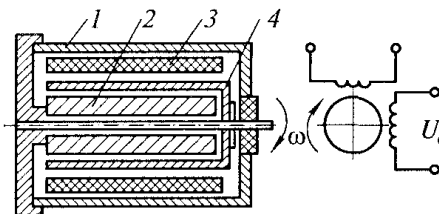


Рис. 4.6. Схема индукционного тахометра:

1 – внешний магнитопровод; 2 – внутренний магнитопровод;
 3 – обмотка; 4 – ротор

Тахогенератор такого прибора представляет собой электрическую машину асинхронного типа, состоящую из внешнего 1 и внутреннего 2 магнитопроводов, в зазоре между которыми располагаются статорная обмотка 3, состоящая из обмотки возбуждения и сигнальной обмотки, и алюминиевый тонкостенный ротор 4, выполненный в виде цилиндра. Оси обмоток (катушек) возбуждения и сигнальной взаимно перпендикулярны. К обмотке возбуждения подводится переменное напряжение частотой 400 Гц, а с сигнальной обмотки снимается напряжение U_c той же частоты, амплитуда которого пропорциональна угловой скорости вращения полого ротора 4.

Индукционные тахометры, имея значительные погрешности, применяются только в качестве чувствительного элемента в системах управления.

Стробоскопический метод измерения угловой скорости основан на свойстве глаза сохранять видимое изображение на десятые доли секунды после его исчезновения. Средства измерения, построенные по этому принципу, являются наиболее точными из рассмотренных выше. Они нашли применение в лабораторных исследованиях, а также при создании образцовых средств измерений. Принцип реализации эффекта поясняет рис. 4.7. Если отметку 4 на вращающемся валу 1 освещать вспышками света от источника 2, то при совпадении числа вспышек с частотой вращения отметка будет казаться неподвижной. Если эта разность будет отлична от нуля, то отметка начнет вращаться со скоростью в ту или иную сторону, в зависимости от знака разности частоты вращения и числа вспышек. Поскольку глаз оператора 3 замечает очень медленное движение отметки, то, подбирая частоту вспышки посредством устройства регулирования вспышки УРВ, можно остановить отметку и определить частоту вращения вала.

Точность измерения определяется точностью воспроизведения и измерения частоты вспышек, точностью регистрации моментов остановки стробоскопической картины.

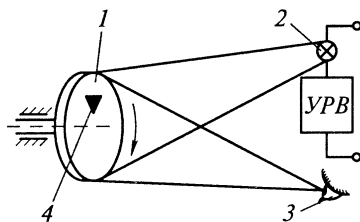


Рис. 4.7. Схема стробоскопического тахометра:

1 – вращающийся вал; 2 – источник света; 3 – глаз оператора; 4 – отметка;
УРВ – устройство регулирования вспышки

4.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЙ

Ускорения измеряются в метрах на секунду в квадрате (м/с^2). В качестве единицы измерения ускорения часто применяют величину, связанную с ускорением свободного падения – g . Например, ускорение, равное $0,1g$; $1,0g$ и т.д. Ускорения могут быть линейными и угловыми. Средства измерения ускорений называются акселерометрами.

Для измерения линейных ускорений применяются инерциальный метод, метод дифференцирования скорости и метод двухкратного дифференцирования расстояния до неподвижной базы.

Инерциальный метод основан на измерении силы, развиваемой инерционной массой при её движении с ускорением. Принцип действия средств измерений, реализующий инерциальный метод, состоит в следующем (рис. 4.8, а). Инерционная масса 1 , связанная с корпусом прибора 4 с помощью пружины 2 и демпфера 5 , может перемещаться в направлении оси 7 , называемой осью чувствительности. Перемещение инерционной массы, пропорциональное измеряемому ускорению, преобразуется посредством резистивных, индуктивных или ёмкостных преобразователей 6 в электрический сигнал, который после усиления в усилителе $У$ поступает на электромагнит 3 . Последний создаёт усилие F , уравновешивающее инерционную силу, т.е.

$$F = ma_x,$$

где a_x – ускорение.

Методы одно- или двухкратного дифференцирования сводятся, соответственно, к дифференцированию измеренных скорости или расстояния до неподвижной базы.

Требования к точности измерения ускорений определяются областью применения. Так, в инерциальных системах погрешности не должны превышать $\pm 0,001\%$. При применении акселерометров в системах управления погрешности могут составлять $\pm(1...2)\%$. Погрешности средств измерения ускорений в машинах могут достигать $\pm 4\%$.

Рассмотрим некоторые возможные схемы акселерометров (см. рис. 4.8, б, в, г).

Основными элементами акселерометров являются подвесы инерционных масс, преобразователи сигналов, моментные (силовые) устройства, усилители сигналов и корректирующие устройства (демпферы).

Для уменьшения потерь в осях подвеса, обеспечения линейной зависимости между отклонениями массы и измеряемым ускорением подвес помещают в жидкость с удельным весом, равным удельному весу чувствительного элемента, либо устанавливают его на воздушной подушке, на струнах. Применяют также электромагнитные и криогенные подвесы.

В качестве преобразователей сигналов применяются ёмкостные, индуктивные, фотоэлектрические, струнные и др. Основные требования к ним: большая разрешающая способность, линейная зависимость выхода от входа, отсутствие реакции преобразователя на чувствительный элемент.

Моментными (силовыми) устройствами для ввода сигналов обратной связи являются моментные двигатели (электродвигатели, работающие в заторможенном режиме) и электромагниты.

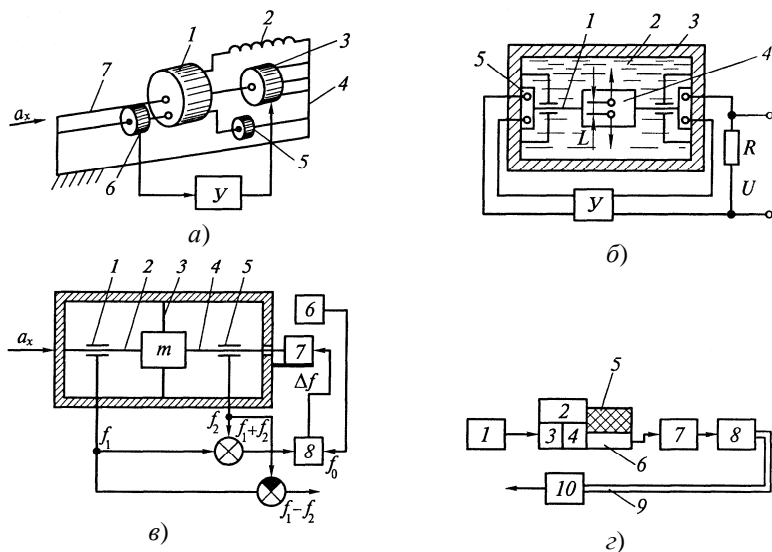


Рис. 4.8. Средства измерения ускорений:

- a* – схема акселерометра (1 – инерционная масса; 2 – пружина; 3 – электромагнит; 4 – корпус прибора; 5 – демпфер; 6 – преобразователь; 7 – ось; У – усилитель); *б* – схема маятникового акселерометра (1 – подвеска; 2 – жидкость; 3 – корпус; 4 – чувствительный элемент; 5 – преобразователь; У – усилитель); *в* – схема струнного акселерометра (1 и 5 – струнный преобразователь; 2 и 4 – струна; 3 – упругий подвес; 6 – генератор; 7 – механизм натяжения струн; 8 – регулирующее устройство); *г* – схема акселерометра с волоконно-оптическим преобразователем (1 – источник света; 2 – акселерометр; 3 и 8 – линза; 4 – поляризатор; 5 – фотоупругий материал; 6 – четвертьволновая пластина; 7 – анализатор; 9 – волоконный светопровод; 10 – приёмник излучения – фотодиод)

В маятниковых акселерометрах (рис. 4.8, б) чувствительный элемент 4 находится в жидкости 2, заключённой в корпусе 3. Температура жидкости поддерживается с точностью до 0,01 °С, что позволяет

устранить её конвективные движения. Сигнал с чувствительного элемента снимается преобразователем 5 и подаётся на усилитель У. С выхода усилителя сигнал поступает на моментный двигатель, развивающий момент, зависящий от ускорения.

В акселерометрах со струнными преобразователями 1 и 5 (рис. 4.8, в) смещение массы m меняет упругие свойства струн 2 и 4, натянутых в направлении оси чувствительности. Упругий подвес 3 исключает движение массы m в поперечном направлении. Сумма частот колебаний струн 2 и 4 ($f_1 + f_2$) поддерживается постоянной посредством регулирующего устройства 8, для чего она сравнивается с эталонной частотой f_0 , вырабатываемой генератором 6. Разность $\Delta f = (f_1 + f_2) - f_0$ используется для управления механизмом 7 натяжения струн. При поддержании значения ($f_1 + f_2$) постоянным получается линейная зависимость между измеряемым ускорением a_x и разностью частот Δf .

Струнные акселерометры находят применение в инерциальных системах управления. При диапазоне измерения ускорений до 20g погрешность не превышает $\pm 0,004\%$.

Акселерометр с волоконно-оптическим измерительным преобразователем основан на эффекте фотоупругости. Некоторые материалы (эпоксидная смола, нитрат лития и др.) меняют свои оптические свойства при их деформировании. На этой основе создан целый ряд средств измерения, в которых сила преобразуется в деформацию. На рис. 4.8, г источник света 1 (например, полупроводниковый лазер), проходя через линзу 3 и поляризатор 4, поступает на стержень из фотоупругого материала 5, изменяющий своё напряжённое состояние в зависимости от ускорения груза акселерометра 2. Преобразуя полученный сигнал с помощью четвертьволновой пластины 6, анализатора 7 и линзы 8, он поступает по волоконному светопроводу 9 на приёмник излучения (фотодиод) 10. В результате определяется величина ускорения с достаточно высокой точностью. Так, при массе груза 25 г порог чувствительности рассмотренного акселерометра составляет 0,01g.

В настоящее время всё большее применение получают пьезоакселерометры.

Существует большое количество моделей пьезоакселерометров, которые можно классифицировать по следующим признакам:

по виду деформации пьезоэлемента (работающие на сжатие–растяжение, сдвиг, изгиб);

по способу закрепления пьезоэлемента (клеёные, с предварительным поджатием, клеёно-поджатые);

по способу закрепления на объекте (прижимные, клеёно-прижимные, приклеиваемые, с резьбовым соединением).

По эксплуатационным признакам различают:

- 1) пьезоакселерометры с высоким коэффициентом преобразования (чувствительностью) – более $10 \text{ мВ} \cdot \text{с}^2/\text{м}$;
- 2) виброударные – для ускорений более 10000 м/с^2 ;
- 3) высокотемпературные – выше $80 \text{ }^\circ\text{C}$;
- 4) устойчивые к возникновению различных влияющих факторов (акустических шумов, механических деформаций, электрических и магнитных полей и т. п.).

Большое значение коэффициента преобразования в основном достигается увеличением массы инерционного тела, уменьшением ёмкости пьезоэлемента, использованием изгибных или сдвиговых деформаций, использованием пьезокерамики с большим значением пьезомодуля.

Температурную стабильность повышают искусственным старением пьезоэлементов путём их нагрева или механического и электрического нагружения, применением термостойких клеев и материалов.

Способ и качество крепления пьезоакселерометров на объекте – важный фактор, влияющий на точность его работы.

Для измерения вибраций при температуре выше $80 \text{ }^\circ\text{C}$ используют высокотемпературные пьезоакселерометры. Кроме того, применяют охлаждённый водой переходник и металлический экран, предохраняющий выводной кабель от радиационного нагрева. Используют также обдув воздухом.

Принципиальная схема простейшего пьезоакселерометра представлена на рис. 4.9. Все детали склеиваются обычно эпоксидными смолами.

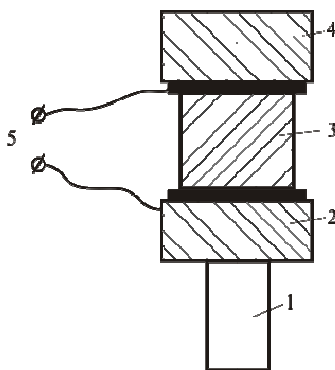


Рис. 4.9. Схема простейшего пьезоакселерометра:

- 1 – хвостовик для крепления; 2 – основание и корпус; 3 – пьезоэлемент;
4 – инерционный элемент; 5 – электрические выводы

Принцип действия основан на использовании прямого пьезоэффекта. При движении инерционного элемента массой m с ускорением a возникает сила $F = ma$, которая приложена к пьезоэлементу, на гранях которого возникает ЭДС, подаваемая через электрические выводы на вторичный прибор.

К наиболее существенным недостаткам рассмотренных пьезоакселерометров, построенных на использовании прямого пьезоэффекта, следует отнести:

- невозможность измерять ускорения с нуля;
- относительно малое соотношение полезного сигнала к шумам и помехам;
- заметная чувствительность к поперечным компонентам вибрации;
- изменение чувствительности пьезоматериалов при изменении температуры (так, при использовании керамики ШТС в диапазоне температур до 40...60 °С погрешность допускается равной $\pm 5\%$. Обеспечение погрешности до $\pm 2\%$ в диапазоне 400...450 °С возможно только при использовании кварца).

Описанный метод применяется в виброметрии, где действующие на кристалл силы изменяются сравнительно с большой частотой. Для измерения же медленно меняющихся ускорений этот метод мало пригоден: электрические заряды с поверхности кварца стекают через конечное сопротивление измерительной аппаратуры, что приводит к значительным погрешностям.

Виброакселерометры на базе пьезоэлектрических преобразователей имеют достаточно высокую чувствительность, простую конструкцию и низкую стоимость. Однако в обычном исполнении их применяют только для измерения высокочастотных параметров движения. Сложилось мнение о невозможности измерения постоянных или медленно изменяющихся ускорений с помощью пьезопреобразователей, как чувствительных элементов акселерометров.

Однако было установлено, что если к пластинке, вырезанной определённым образом из кристалла кварца, приложить переменное электрическое поле, то пластинка вследствие обратного пьезоэффекта начнёт колебаться с частотой этого поля. Амплитуда колебаний в общем случае мала, но если частота возбуждающего поля совпадает с одной из собственных частот механических колебаний пластинки, то амплитуда резко возрастает. Оказалось, что будучи включённой в электрическую цепь переменного тока, такая пластина ведёт себя подобно электрическому колебательному контуру, только с очень большой добротностью (отношение реактивной энергии в контуре к энер-

гии активных потерь в нём за период колебаний). Если добротность обычных колебательных контуров исчисляется десятками и сотнями, то добротность кварцевых элементов (кварцевая пластина с нанесёнными на её поверхность электродами) исчисляется десятками и сотнями тысяч и даже миллионами. Если включить в состав генераторов электрических колебаний в качестве избирательных систем вместо обычных контуров кварцевые пьезоэлементы, то можно добиться очень высокой стабильности частоты этих генераторов. Например, суточная вариация частоты кварцевых генераторов государственного эталона времени и частоты составляет всего $\pm 1 \cdot 10^{-11}$.

В процессе эксплуатации кварцевых генераторов было замечено, что при изменении силы зажатия кварцевой пластины элементами крепления частота генератора меняется. Это явление было использовано для измерения медленно меняющихся ускорений.

Схема одного из типов кварцевого акселерометра, основанного на принципе обратного пьезоэффекта, изображена на рис. 4.10.

В состав прибора входят инерционная масса 1 , подвешенная на упругих растяжках 2 в корпусе 3 , два идентичных кварцевых пьезоэлемента 4 , входящие в состав двух кварцевых генераторов 5 , вычитающее устройство 6 (смеситель с полосовым фильтром). Если ускорение в направлении измерительной оси прибора отсутствует, то инерционная масса 1 давит на кварцевые пьезоэлементы 4 с одинаковой силой, равной силе начального зажатия. Поскольку кварцевые генераторы 5 работают на одинаковой частоте, то $f_1 = f_2$ и разность частот $\Delta f = 0$ на выходном устройстве 6 . Если же прибор начинает двигаться с ускорением в направлении измерительной оси, то инерционная масса создаёт добавочное давление на один из кварцевых пьезоэлементов и ослабляет давление на другой кварцевый пьезоэлемент.

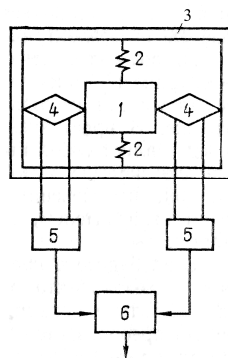


Рис. 4.10. Схема пьезоакселерометра для измерения малых ускорений

При этом частота одного из кварцевых генераторов увеличится, а другого уменьшится. С устройства 6 выйдет разностная частота Δf , абсолютная величина которой пропорциональна ускорению, а фаза указывает направление ускорения.

4.4. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИЙ

При измерении вибраций всегда участвуют три элемента: вибрирующее звено, исходное звено и устройство для измерения движения вибрирующего звена относительно невибрирующего. Средство измерения параметров вибраций носит название виброметр (рис. 4.11, *а*). Обычно исходное (невибрирующее) звено создаётся с помощью массы, которая может перемещаться вдоль (или вокруг) оси вибраций. Масса 1 связывается с основанием прибора 4 с помощью пружины 2 и демпфера 3. Преобразователь 5 выдаёт сигнал смещения корпуса относительно массы 1, в зависимости от параметров массы 1, пружины 2 и демпфера 3. Сигнал может быть пропорциональным относительному перемещению массы 1 и основания прибора 4, относительной скорости или ускорению. Масса 1 виброметра носит название сейсмического элемента, а система, образуемая из массы 1, пружины 2 и демпфера 3 – сейсмической системы.

Рассмотрим конструктивные схемы некоторых типов виброметров.

Применяемые в настоящее время виброметры имеют электрический выход. В качестве преобразователей перемещения в электрический сигнал используют резисторные, индуктивные, ёмкостные, электромагнитные и др.

На рисунке 4.11, *б* представлена конструкция электромагнитного линейного виброметра с направляющей опорой для сейсмического элемента. Сейсмический элемент 8 установлен на опорном стержне 4 в вязкой жидкости 3. Направляющий диск 1 втулки 5 с малым трением позволяют перемещаться сейсмическому элементу вдоль оси чувствительности 2. Величина перемещения (вибрации) определяется наведением токов в обмотке 7, постоянным магнитом 6, закреплённым в сейсмическом элементе 8.

Виброметр этого типа при объёме 90 см³ и весе 450 г обладает собственной частотой 10 Гц, чувствительностью 0,03 В/(см·с⁻²) и диапазоном входных смещений ±0,5 см.

Виброметр с индуктивным мостом (см. рис. 4.11, *в*). Сейсмический элемент 7, представляющий собой цилиндр из магнитного материала с малым гистерезисом, выполняет функции якоря 12 и перемещается между двумя катушками 5 в свободном пространстве, заполненном вязкой жидкостью 11. Сейсмический элемент 7 установлен на опорном стержне 1 с немагнитными втулками 3 и 9 и связан с корпусом прибора 13 пружинами 4 и 8. Регистрация сигнала виброметра производится на осциллографе. Виброметр при объёме 45 см³ весит 200 г.

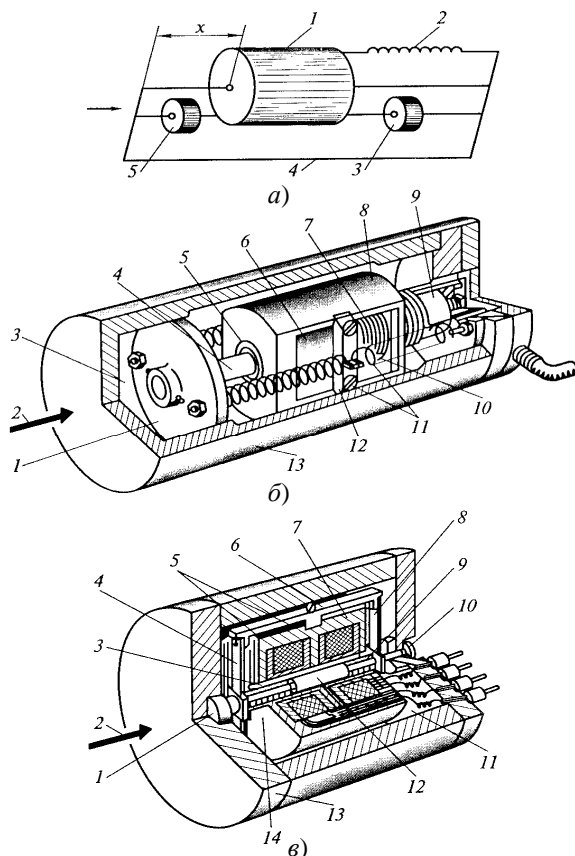


Рис. 4.11. Средства измерения вибраций:

- a* – конструкция виброметра (1 – масса; 2 – пружина; 3 – демпфер; 4 – основание прибора; 5 – преобразователь); *б* – конструкция электромагнитного линейного виброметра (1 – направляющий диск; 2 – ось чувствительности; 3 – жидкость; 4 – опорный стержень; 5 – втулка; 6 – постоянный магнит; 7 – обмотка; 8 – сейсмический элемент; 9 – каркас катушки; 10 – паз; 11 – воздушный зазор; 12 – пружинный мост; 13 – корпус прибора); *в* – конструкция виброметра с индуктивным мостом (1 – опорный стержень; 2 – входная ось; 3 и 9 – немагнитная втулка; 4 – пружина; 5 – катушки; 6 – лента; 7 – сейсмический элемент; 8 – пластинчатая пружина; 10 – паз; 11 – жидкость; 12 – якорь; 13 – корпус; 14 – шток)

При питании напряжением 10 В 400 Гц он обладает чувствительностью $0,01 \text{ В}/(\text{см}\cdot\text{с}^2)$. Прибор работает в диапазоне измерения ускорений до 10 g.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

1. Нарисовать схему измерения деформации упругой балки с помощью тензорезисторов, включённых в мостовую измерительную схему с четырьмя активными плечами.

2. Приведите классификацию средств измерения давления, в зависимости от вида измеряемого давления.

3. Приведите классификацию средств измерения давления, в зависимости от принципа действия.

4. Запишите виды средств измерения давления, уровня, расхода, массы и других, в которых применяются пьезоэлементы. В каком качестве они применяются?

5. Почему электронные весы необходимо градуировать непосредственно в пункте их использования?

5. Какие расходомеры нельзя использовать для неэлектропроводных жидкостей?

6. Нарисуйте упрощённую схему измерения расхода тепловым расходомером с применением байпасной линии.

7. Какая из мембран в мембранном дифманометре должна быть менее жёсткой, чтобы уменьшить погрешность из-за расширения жидкости в мембранных коробках при колебаниях температуры окружающей среды?

8. При каком режиме течения, ламинарном или турбулентном, погрешность измерения расхода расходомерами переменного перепада давления будет больше?

9. Какие расходомеры позволяют измерять ещё и плотность жидкостей?

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во второй части пособия по дисциплине «Методы и средства измерений, испытаний и контроля» приведена классификация методов и средств измерения изучаемых параметров и информация о принципе их действия и конструкции. Приведённая в пособии информация поможет сформировать у студентов системное представление о средствах измерений, испытаний и методологии их использования в обеспечении качества продукции.

В последующих частях будут рассмотрены методы и средства измерения тепловых, оптических, радиационных величин, а также приборы для контроля состава и свойства веществ. Особое место будет уделено методам и видам испытаний продукции на вибрационные, ударные, климатические и другие виды воздействий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зайцев, С.А. Контрольно-измерительные приборы и инструменты : учебное пособие / С.А. Зайцев, Д.Д. Грибанов, А.Н. Толстов, Р.В. Меркулов. – М. : Издательский центр «Академия», 2006. – 464 с.
2. Раннев, Г.Г. Методы и средства измерений : учебник для вузов / Г.Г. Раннев, А.П. Тарасенко. – 3-е изд., стер. Издательский центр «Академия», 2006. – 336 с.
3. Харт, Х. Введение в измерительную технику / Х. Харт ; пер. с нем. – М.: Мир, 1999. – 391 с.
4. Ключев, В.В. Неразрушающий контроль и диагностика: справочник / под ред. В.В. Ключева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2005. – 656 с.
5. Эткин, Л.Г. Виброчастотные датчики. Теория и практика / Л.Г. Эткин. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 408 с.
6. Болтон, У. Карманный справочник инженера метролога / У. Болтон. – М. : Издательский дом «Додека-XXI», 2002. – 384 с.

ГЛОССАРИЙ

<i>Акселерометр</i>	средство измерения ускорения
<i>Байпас</i>	обводная линия с запорными вентилями для возможного отключения прибора без перекрытия потока жидкости в трубопроводе
<i>Вакуум</i>	состояние газа, при котором его давление меньше атмосферного
<i>Виброметр</i>	средство измерения параметров вибраций машин, устройств и сооружений
<i>Вихревой расходомер</i>	это расходомер, основанный на зависимости от расхода частоты образования вихрей, возникающих в потоке в процессе обтекания тела
<i>Времяимпульсный ультразвуковой расходомер</i>	ультразвуковой расходомер, использующий времяимпульсный способ измерения разности времен, которые требуются для прохождения акустических колебаний по потоку и против него
<i>Вихри Кармана</i>	чередующиеся вихри, возникающие при некотором определённом числе Рейнольдса в случае помещения цилиндрического стержня поперёк потока
<i>Давление</i>	равномерно распределённая сила, действующая перпендикулярно на единицу площади
<i>Давление динамическое</i>	давление, обусловленное скоростью движения потока газа или жидкости
<i>Давление избыточное</i>	определяется разностью между абсолютным давлением и атмосферным давлением
<i>Давление полное</i>	сумма статического и динамического давлений
<i>Давление статическое</i>	это давление, зависящее от запаса потенциальной энергии газовой или жидкостной среды
<i>Дифманометр</i>	средство измерения разности двух давлений, ни одно из которых не равно атмосферному
<i>Камерная диафрагма</i>	нормальная диафрагма, снабжённая кольцевыми камерами для отбора перепада давления у плоскостей диска диафрагмы
<i>Корреляционный расходомер</i>	расходомер, основанный на определении абсциссы максимальной ординаты взаимной корреляционной функции случайно изменяющегося параметра потока в двух сечениях, находящихся на небольшом расстоянии друг от друга Эта абсцисса соответствует времени перемещения потока на указанное расстояние
<i>Коэффициент Пуассона</i>	коэффициент, определяющий деформацию, перпендикулярную направлению действия силы (чем больше коэффициент Пуассона, тем больше деформация)
<i>Ламинарное течение</i>	течение, при котором жидкость (или газ) перемещается слоями без перемешивания

<i>Магнитоупругий датчик</i>	измерительный преобразователь механических усилий или давления в электрический сигнал
<i>Магнитоупругий эффект</i>	изменение магнитных свойств ферромагнитных материалов под воздействием механического напряжения
<i>Магнитоstrictionный эффект</i>	изменение формы и размеров ферромагнитного тела при намагничивании
<i>Мембранный дифманометр</i>	дифманометр, представляющий дифференциальный датчик давления с общим упругим элементом в виде мембраны или мембранной коробки
<i>Мембранная коробка</i>	пружина, состоящая из двух гофрированных мембран, сваренных по периферии между собой
<i>Нормальная диафрагма</i>	тонкий диск, имеющий круглое отверстие, расположенное концентрично оси трубы, с прямоугольной кромкой на стороне входа и со скосом на стороне выхода (при значительной толщине диска диафрагмы)
<i>Нормальное сопло</i>	сопло, у которого сужающаяся часть на входе, образованная дугами двух радиусов, переходит в цилиндрическую часть на выходе
<i>Пьезоэффект обратный</i>	изменение геометрических размеров пьезоэлектрика при изменении в нём параметров электрического поля
<i>Пьезоэффект прямой</i>	возникновение электрических зарядов на гранях пьезоэлектрика при воздействии на него механической силы, вызывающей механическое напряжение в материале
<i>Расход</i>	количество вещества (массы или объёма), проходящее через определённое сечение канала (трубопровода) в единицу времени
<i>Расходомер перемемного перепада давления</i>	расходомер, основанный на измерении перепада давления, создаваемого в зависимости от расхода жидкости, газа или пара с помощью сужающего устройства, трубного сопротивления или напорного усилителя
<i>Расходомер постоянного перепада давления</i>	расходомер, состоящий из вертикальной трубки и тела, перемещающегося вверх под действием потока, при этом конструкции трубки и тела таковы, что перепад давления, соответствующий весу тела, достигается на высоте, определяемой расходом
<i>Ротаметр</i>	расходомер, состоящий из вертикальной трубки и поплавка, перемещающегося вверх под действием потока; для реализации зависимости перемещения от расхода в трубке выполняется коническая расточка, либо поплавок имеет коническую форму
<i>Сопло</i>	сужающее устройство в виде насадки с круглым концентричным отверстием, имеющим плавное сужающуюся часть на входе и цилиндрическую часть на выходе, а в особых случаях только сужающуюся или только цилиндрическую часть

<i>Сужающее устройство</i>	приёмный преобразователь системы переменного перепада давления, создающий в потоке жидкости, газа или пара сужение течения, вызывающее (в результате перехода части потенциальной энергии в кинетическую) образование перепада давления в зависимости от расхода, и снабжённый устройством для отбора этого перепада давления
<i>Тепловой расходомер</i>	расходомер, основанный на нагреве потока жидкости или газа посторонним источником энергии, создающим в потоке разность температур, зависящую от скорости потока и от расхода тепла в нагревателе
<i>Коэффициент тензочувствительности</i>	отношение относительного изменения сопротивления тензорезистора к относительной деформации
<i>Мессдоза</i>	гидравлический измеритель механической силы
<i>Тахометр</i>	средство измерения угловой скорости вращения резистор, сопротивление которого изменяется при деформации
<i>Тензорезистор</i>	
<i>Термоанемометр</i>	прибор, основанный на зависимости между количеством тепла, теряемым непрерывно нагреваемым или предварительно нагретым телом, и скоростью потока газа (редко жидкостью), в котором это тело находится
<i>Труба Вентури с коническим входом</i>	расходомерная труба с длинным диффузором, входным цилиндрическим участком, переходящим в сходящуюся коническую часть с углом 21° , и цилиндрическим горлом
<i>Турбулентное течение</i>	течение жидкости или газа, при котором частицы вещества совершают неупорядоченные, хаотические движения по сложным траекториям, а скорость, температура, давление и плотность среды испытывают хаотические флуктуации
<i>Электромагнитный (индукционный) расходомер</i>	расходомер, основанный на возникновении ЭДС, индуцируемой в потоке электропроводной жидкости, которая при своем движении пересекает магнитное поле

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СИЛОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И МАССЫ	4
1.1. Тензорезисторные преобразователи	4
1.2. Средства измерения силы на основе упругих элементов	8
1.3. Угольные датчики механических усилий	12
1.4. Пьезоэлектрические датчики динамических усилий	13
1.5. Магнитоупругие преобразователи механических усилий и деформаций	15
1.6. Виброчастотные преобразователи силы	22
1.7. Гидравлические измерители силы	22
1.8. Средства измерения давления	23
1.8.1. Классификация приборов для измерения давления	23
1.8.2. Методы и средства измерения и контроля давления	24
1.9. Средства измерения массы	39
2. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ	45
2.1. Визуальные уровнемеры	46
2.2. Поплавковые уровнемеры	47
2.3. Гидростатические уровнемеры	48
2.4. Пьезометрические уровнемеры	50
2.5. Ёмкостные уровнемеры	51
2.6. Кондуктометрические (омические) преобразователи	53
2.7. Методы определения уровня по времени прохождения сигнала	54
2.8. Магнитные погружные зонды для непрерывного измерения уровня	58
2.10. Измерение уровня сыпучих тел	58
3. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ	59
3.1. Расходомеры постоянного перепада давлений (ротаметры)	61
3.2. Расходомеры переменного уровня (щелевые расходомеры)	62
3.3. Электромагнитные расходомеры	65
3.4. Расходомеры переменного перепада давления	65

3.5. Кариолисовы расходомеры	72
3.6. Вихревые расходомеры	74
3.7. Корреляционные расходомеры	77
3.8. Ультразвуковые расходомеры	79
3.9. Тепловые расходомеры	81
4. СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ И УСКОРЕНИЙ	82
4.1. Методы и средства измерения и контроля линейных скоростей	82
4.2. Методы и средства измерения и контроля скоростей вращения	85
4.3. Методы и средства измерения ускорений	90
4.4. Методы и средства измерения параметров вибраций	96
ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ	98
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	100
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	101
ГЛОССАРИЙ	102

Учебное издание

ДИВИН Александр Георгиевич,
ПОНОМАРЕВ Сергей Владимирович,
МОЗГОВА Галина Владимировна

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЙ, ИСПЫТАНИЙ И КОНТРОЛЯ

Часть 2

Учебное пособие

Редактор И.В. Калистратова
Инженер по компьютерному макетированию М.А. Филатова

Подписано в печать 22.06.2012
Формат 60 × 84/16. 6,27 усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 372

Издательско-полиграфический центр ФГБОУ ВПО «ТГТУ»
392000, г. Тамбов, ул. Советская, д. 106, к. 14