



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра кораблестроения и гидравлики

В. В. Кулебякин

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие

**Минск
БНТУ
2015**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра кораблестроения и гидравлики

В. В. Кулебякин

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 03 02
«Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности*

Минск
БНТУ
2015

УДК 681.2: 66(075.8)

ББК 34.9я7

К90

Рецензенты:

кандидат технических наук *А. В. Суворов*;

кандидат технических наук *А. С. Матвейчук*

Кулебякин, В. В.

К90 Методы и приборы для измерения давления : учебно-методическое пособие для студентов специальности 1-37 03 02 «Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта» / В. В. Кулебякин. – Минск : БНТУ, 2015. – 36 с.

ISBN 978-985-550-722-3.

В учебно-методическом пособии изложены основные методы и конструктивные особенности современных средств измерения давления, применяемые в научно-исследовательских и промышленно-технологических процессах. Пособие может быть использовано в самостоятельной работе студентов строительных и других специальностей БНТУ при подготовке к экзаменам и зачетам, при выполнении лабораторных работ и проведении практических занятий по дисциплинам «Механика жидкости и газа» и «Гидравлика».

УДК 681.2: 66(075.8)

ББК 34.9я7

ISBN 978-985-550-722-3

© Кулебякин В. В., 2015

© Белорусский национальный
технический университет, 2015

Введение

Почти 70 % всех измерений, выполняемых в научных исследованиях, промышленности и сельском хозяйстве, связаны с измерениями давления и расхода различных веществ.

Давление является основным рабочим параметром, точность и надежность измерения которого определяют ценность результатов экспериментальных исследований в гидро- и газодинамике, качество проведения технологических процессов в химической, пищевой, бумажной промышленности, оптимальность режимов работы объектов ракетной техники и авиации, энергетики и транспорта, эффективность систем добычи, транспортировки и переработки нефти и газа.

Разнообразие требований к технике и методикам измерения давления, обусловленное спецификой различных отраслей промышленности, строительства, транспорта, а также различные физико-химические свойства измеряемых сред породили многочисленные различные методы и средства измерений давления. Можно с уверенностью утверждать, что в лишь немногих других областях измерений имеется такое обилие реализованных идей и технических решений, как в сфере измерений давления. Причем почти все известные на сегодняшний день физические закономерности нашли свое воплощение в методиках и технических средствах измерения давления.

Понять физические принципы измерений, уяснить причины и источники возможных ошибок и погрешностей измерений, а следовательно, научиться грамотно выбирать и применять, а также проводить метрологическое обслуживание средств измерения давления – такова основная задача, на решение которой ориентировано данное пособие. Поэтому в нем основное внимание уделено физике явлений, лежащих в основе той или иной методики измерения, рассмотрению и оценке возможных погрешностей, а также – обоснованию областей и условий применения тех или иных измерительных устройств.

Также особое внимание уделено метрологии проведения измерений, поскольку на сегодняшний день эталонные и образцовые базы для этих областей измерений все еще отстают от современных потребностей науки и производства. Следовательно, совершенствование приемов и принципов метрологического обслуживания этих средств измерений является важнейшей задачей инженеров и метрологов любой квалификации, специализирующихся в данной области измерений.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Давлением p называют отношение абсолютной величины нормального, то есть действующего перпендикулярно к поверхности тела со стороны жидкости или газа, вектора силы к площади этой поверхности. Если сила равномерно распределена по площади, то указанное отношение задает точное (и одинаковое) значение давления в каждой ее точке, в противном же случае – только его среднее значение по площади. Истинное значение давления, как правило, меняется от точки к точке на поверхности и определяется следующей формулой:

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta S} = \frac{dF}{dS}.$$

Давление, в соответствии с законом Паскаля, передается в среде без изменений и равномерно во все стороны. Таким образом, давление направлено перпендикулярно к любой внутренней площадке среды независимо от ее формы и ориентации в пространстве.

Давление, измеряемое относительно абсолютного вакуума (состояние среды в замкнутом объеме, если бы из него были удалены все молекулы), называют *абсолютным* давлением. *Барометрическое* давление – это абсолютное давление, создаваемое земной атмосферой. Оно зависит от конкретных условий: температуры воздуха и высоты расположения точки измерения над уровнем моря. Давление, которое больше или меньше атмосферного, но измеряется относительно атмосферного, соответственно называют *избыточным*. Если эта разность между абсолютным и атмосферным давлением больше нуля, то для нее используется термин *манометрическое* давление, если же она отрицательна, то ее величина называется *вакуумметрическое* давление. Разность давлений среды в двух различных процессах или двух точках одного процесса, при котором ни одно из давлений не является атмосферным, называют *дифференциальным* давлением.

В настоящее время для измерения давления используют как системные, так и внесистемные единицы давления. В соответствии со стандартом (СТ СЭВ 1052–89) единицы давления определяются одним из двух способов:

- через высоту столба жидкости, уравнивающей измеряемое давление в конкретном физическом процессе: в единицах водяного столба при 4 °С или ртутного столба при 0 °С при нормальном ускорении свободного падения. В англоязычных странах используются соответствующие единицы **in H₂O – дюйм вод. ст.** или **ft H₂O – фут вод. ст.**, а также **in Hg – дюйм рт. ст.**;

- через единицы силы и площади. В Международной системе единиц (СИ), принятой в 1960 году, единицей давления является **Па** (паскаль), определяемая действием силы в 1 **Н** на единицу поверхности 1 **м²**, отсюда 1 **Па** = 1 **Н/м²**. Наряду с системой СИ при измерениях давления продолжают использоваться единицы и других, более ранних систем, а также внесистемные единицы. В технической системе единиц МКГСС (метр, килограмм-сила, секунда) сила измеряется в килограммах силы (1 кгс ~ 9,81 Н). Единица давления в МКГСС (1 кгс/м²) получила название **технической атмосферы**. В случае измерения в единицах технических атмосфер избыточного давления используется обозначение **ати**. В физической системе единиц СГС (сантиметр, грамм, секунда) единицей силы является **дина** (1 дин = 10⁵ Н). В рамках СГС введена единица давления **бар** (1 бар = 1 дин/см²). Существует также одноименная внесистемная метеорологическая единица 1 бар = 10⁶ дин/см² (**стандартная атмосфера**). Кроме указанных единиц на практике используется такая внесистемная единица, как **физическая** или **нормальная атмосфера (атм.)**, которая эквивалентна уравнивающему столбу 760 мм рт. ст. В англоязычных странах широко распространена единица давления **psi** (1 psi = 1 bf/in²) – **фунт силы на квадратный дюйм** (1 фунт = 0,4536 кгс, 1 дюйм = 2,54 см). При измерении абсолютного и избыточного давления используются соответственно обозначения **psia** (абсолютное) и **psig** (избыточное). Соотношения между применяемыми единицами давления приведены в таблице.

Соотношения между различными единицами измерения давления

Обозначение единиц	Па	кгс/см ²	атм.	бар	мм рт. ст.	мм вод. ст.
Па	1	1,02 · 10 ⁻⁵	9,87 · 10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	75 · 10 ⁻⁴	0,102
кгс/см ²	9,81 · 10 ⁴	1	0,968	0,981	736	10 ⁴
атм.	1,013 · 10 ⁵	1,033	1	1,013	760	1,033 · 10 ⁴

Окончание таблицы

Обозначение единиц	Па	кгс/см ²	атм.	бар	мм рт. ст.	мм вод. ст.
бар	10 ⁵	1,02	0,987	1	750	1,02 · 10 ⁴
мм рт. ст.	133	1,36 · 10 ⁻³	1,32 · 10 ⁻³	1,33 · 10 ⁻³	1	13,6
мм вод. ст.	9,81	10 ⁻⁴	9,68 · 10 ⁻⁵	9,81 · 10 ⁻⁵	7,36 · 10 ⁻²	1

Диапазон давлений, измеряемых в технике, достаточно широк: от 10⁻⁸ Па в электровакуумном оборудовании до 10³ МПа при обработке металлов давлением. Для воспроизведения единиц давления используются первичные (национальные) и вторичные (рабочие) эталоны давления. Для поддиапазона давлений 1–100 кПа в качестве первичного эталона, как правило, используется ртутный двухтрубный (U-образный) манометр с лазерным считыванием высоты мениска. Погрешность считывания для данного эталона – не более 10⁻³ мм, а абсолютная суммарная погрешность прибора, в том числе учитывающая влияние температуры, не превышает 0,0005 % от верхней границы диапазона. Для поддиапазона 100 кПа–100 МПа применяются газовые грузопоршневые манометры с точностью 0,0035–0,004 % от показаний. Газовые и жидкостные грузопоршневые манометры используются как рабочие эталоны для передачи единиц давления промышленным образцовым приборам, их точность составляет 0,01–0,1 %.

2. КЛАССИФИКАЦИЯ СРЕДСТВ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

Для прямого измерения давления жидкой или газообразной среды с отображением его значения непосредственно на шкале, табло или индикаторе первичного измерительного прибора применяются манометры (ГОСТ 8.271–77). Если отображение значения давления на самом первичном приборе не производится, но он позволяет получать и дистанционно передавать соответствующий измеряемому параметру сигнал, то такой прибор называют *измерительным преобразователем давления* (ИПД) или *датчиком давления*. Однако возможно и объединение этих двух свойств в одном приборе, который в этом случае называется манометром-датчиком. Манометры классифицируют по принципу действия и конструкции, по виду из-

меряемого давления, применению и назначению, типу отображения данных и другим признакам.

По принципу действия манометры можно подразделить на следующие:

- **жидкостные**, в которых измеряемое давление уравнивается гидростатически столбом воды, ртути или другой жидкости соответствующей высоты;

- **деформационные**, в которых давление определяется по величине деформации и перемещения упругого чувствительного элемента (УЧЭ), представляющего собой мембрану, трубчатую пружину или сильфон;

- **грузопоршневые**, в которых измеряемое или воспроизводимое давление гидростатически уравнивается через жидкую или газообразную среду прибора давлением, создаваемым весом поршня, нагружаемого образцовыми гирями;

- **электрические**, в которых давление определяется на основании зависимости электрических параметров (сопротивления, емкости, заряда, частоты колебаний чувствительного элемента (ЧЭ)) от измеряемого давления.

В промышленности при локальных измерениях давлений энергоносителей и других сред в большинстве случаев используются деформационные манометры, использующие одновитковую трубчатую пружину, называемую трубкой Бурдона, для непосредственно показывающих стрелочных приборов или многовитковую пружину – для самопишущих манометров. В настоящее время на смену этим манометрам всё больше приходят электрические манометры с цифровым табло и развитой системой интерфейсов для связи с вычислительно-управляющей техникой.

По виду измеряемого давления манометры подразделяют на приборы измерения избыточного и абсолютного давления – собственно манометры, разрежения – **вакуумметры**, давления и разрежения – **мановакуумметры**, атмосферного давления – **барометры** и разностного давления – **дифференциальные манометры** (дифманометры). Манометры, вакуумметры и мановакуумметры для измерения небольших (до 20–40 кПа) давлений газовых сред называют соответственно **напоромерами**, **тягомерами** и **тягонапоромерами**, а дифманометры с таким же диапазоном измерения – **микроманометрами** (ГОСТ 8.271–77). Технические характеристики

ки всех этих средств измерения давления определяются соответствующими общими нормативными документами (ГОСТ 2405–88, ГОСТ 18140–81 и др.).

По области применения манометры подразделяют на следующие:

- **общепромышленные** (технические), работающие в промышленных условиях (при перепадах температур и влажности окружающей среды, вибрациях, загрязнениях внешней среды и т. п.);
- **лабораторные** (приборы повышенной точности) для использования в стабильных условиях лабораторий;
- **специальные**, которые применяют в экстремальных условиях: на транспорте, котельных установках, при работе с агрессивными средами и т. п.;
- **образцовые**, служащие для поверки рабочих манометров;
- **эталонные** – хранители единиц давления с целью передачи их образцовым приборам.

По способу отображения значений измеряемого давления существуют следующие типы манометров:

- **показывающие**, у которых считывание данных производится непосредственно по аналоговой (стрелочной) или цифровой шкале прибора;
- **сигнализирующие** (электроконтактные) – с выдачей управляющего электрического сигнала путем замыкания или размыкания контактов при достижении измеряемым давлением заранее установленного контрольного значения;
- **регистрирующие** (самопишущие) – с записью в память значений давления как функции времени и их отображением на электронном табло или диаграммной бумаге.

Манометры выполняют функцию локального контроля и в большинстве случаев из-за отсутствия возможности дистанционного доступа к их показаниям, за исключением манометров с унифицированным выходным электрическим сигналом, не могут быть использованы для целей современной автоматизации.

3. ЖИДКОСТНЫЕ ПРИБОРЫ ДАВЛЕНИЯ

Манометры U-образные и чашечные

Жидкостные приборы, основанные на гидростатическом принципе действия, широко применяют для измерения давления и разрежения, а также разности давлений. Несмотря на то, что кроме жидкостных приборов имеется достаточное количество современных приборов, основанных на других способах измерения давления, все же они до сих пор широко применяются как в лабораторной практике, так и в различных отраслях промышленности. Причина этого – простота обращения, относительно высокая точность измерения и их дешевизна.

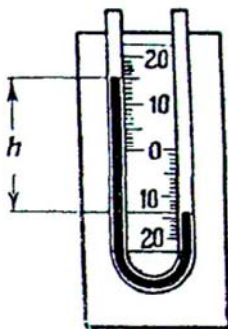


Рис. 3.1. U-образный манометр

U-образный манометр (рис. 3.1) – простейший и вместе с тем точный прибор для измерения давления, разрежения, а также разности давлений.

Основными элементами U-образного манометра являются U-образная стеклянная (либо из другого прозрачного материала) трубка, до половины своей высоты заполненная рабочей жидкостью, и миллиметровая шкала, нанесенная на плоскость основания прибора. Принцип измерения давления с помощью этого прибора основан на непосредственном наблюдении разности уровней h рабочей жидкости. В качестве рабочей жидкости обычно применяют ртуть и воду. Однако при точных измерениях давления капиллярные свойства воды не позволяют применять ее в качестве рабочей жидкости в U-образных манометрах со стеклянными трубками малого диаметра. В этом случае в качестве рабочей жидкости следует применять спирт или толуол.

Если одна из трубок прибора соединена с объектом, где необходимо измерить давление, а другая остается открытой, т. е. соединенной с атмосферой, то величина измеряемого давления p может быть определена по формуле

$$p = \rho gh,$$

где p – избыточное давление, Па;

ρ – плотность рабочей жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

h – разность уровней рабочей жидкости, м.

U-образный манометр, как было сказано выше, может быть использован и для измерения разрежения, т. е. как вакуумметр, а также и как дифференциальный манометр для измерения разности давлений.

Если отсчет высоты столба по U-образному манометру производят невооруженным глазом, то абсолютная погрешность в измерении высоты столба может быть оценена в 1 мм. При этом погрешностью определения плотности рабочей жидкости можно пренебречь, так как по сравнению с погрешностью отсчета она очень мала. Поскольку в U-образном приборе необходимо делать два отсчета (отдельно в каждом колене прибора), то в этом случае наибольшая абсолютная погрешность может достигнуть 2 мм. Отсюда следует, что относительная погрешность при измерении давления, разрежения или разности давлений U-образным манометром зависит в основном от высоты столба рабочей жидкости и точности его отсчета. Для увеличения точности отсчета столба рабочей жидкости образцовые U-образные манометры снабжаются зеркальной шкалой, в этом случае при цене деления шкалы в 1 мм отсчет высоты столба может быть произведен с погрешностью 0,25 мм. Если учесть, что необходимо производить два отсчета, то общая погрешность будет не менее 0,5 мм.

При измерении очень малых давлений, выражающихся высотой столба жидкости всего лишь в несколько миллиметров, U-образный манометр становится весьма грубым и его заменяют прибором, который называется микроманометром. При измерении относительно больших давлений U-образный манометр неудобен, так как для этого требуется значительная длина его колен, что вызывает определенные трудности, особенно в промышленной эксплуатации.

Чашечный манометр представляет собой разновидность U-образного манометра, у которого одно колено трубки выполнено в виде сосуда с сечением, значительно большим, чем второе. Измеряемое

давление, действуя на поверхность рабочей жидкости в широком сосуде, заставляет ее подниматься вверх по стеклянной измерительной трубке. На рис. 3.2 представлена схема чашечного манометра.

Пусть под действием измеряемого давления жидкость в измери-

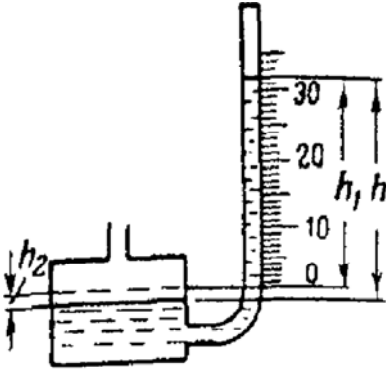


Рис. 3.2. Схема чашечного манометра

тельной трубке поднимется на высоту h_1 , а в широком сосуде опустится на высоту h_2 . Тогда высота столба, соответствующая действительному давлению, будет

$$h = h_1 + h_2.$$

Если F_1 – площадь сечения измерительной трубки, а F_2 – широкого сосуда, то объем вытесненной жидкости в обеих трубках будет одинаковым и определяться выражением

$$F_1 h_1 = F_2 h_2.$$

Решая записанные уравнения относительно h , получим

$$h = h_1 \left(1 + \frac{F_1}{F_2} \right).$$

Для выражения результата измерения в системных единицах давления вышеприведенное соотношение с учетом плотности рабочей жидкости примет вид

$$P = \rho g h_1 \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \right).$$

Микроманометры являются лабораторными приборами и предназначаются для измерения малых давлений, разрежений или незначительных разностей давлений, определяемых несколькими

миллиметрами водяного столба. Применение описанных выше U-образных и чашечных манометров для измерения указанных давлений неоправданно из-за большой погрешности этих приборов. Для уменьшения погрешности в таких приборах применяют специальные оптические устройства или трубке чашечного манометра придается наклонное положение. При проведении технических измерений и измерений, требующих относительно быстрого отсчета, широкое применение нашли микроманометры с наклонной трубкой, так как микроманометры, снабженные оптическими устройствами, в этом случае неудобны.

На рис. 3.3 показан микроманометр с переменным наклоном. При измерении давления его импульс подводится к широкому сосуду, а при измерении разрежения – к наклонной трубке. В случае измерения разности давлений большее давление подводят к широкому сосуду, а меньшее – к трубке. Под действием измеряемого давления уровень рабочей жидкости в трубке, наклоненной к горизонту под углом α , поднимется по вертикали на высоту h_1 , в широком сосуде – опустится на высоту h_2 . Тогда разность высот в приборе будет

$$h = h_1 + h_2,$$

где $h_1 = n \sin \alpha$ (здесь n – перемещение рабочей жидкости в наклонной трубке;

α – угол наклона измерительной трубки).

Если F_1 – площадь сечения измерительной трубки, а F_2 – площадь сечения широкого сосуда, то высота подъема жидкости в трубке определится в соответствии с выражением

$$h = n \left(\sin \alpha + \frac{F_1}{F_2} \right)$$

или

$$p = \rho gh \left(\sin \alpha + \frac{F_1}{F_2} \right).$$

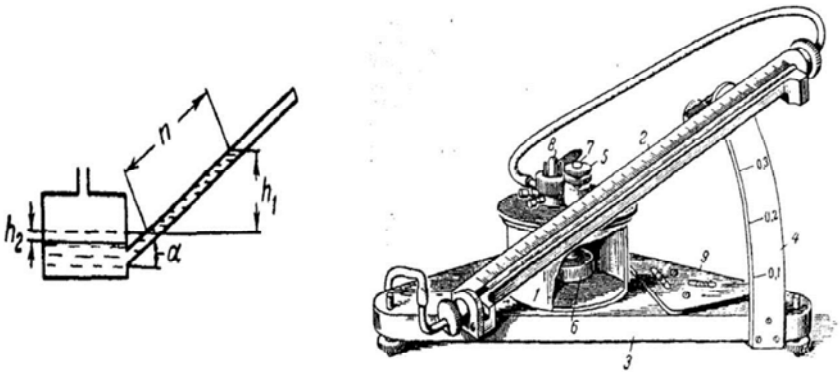


Рис. 3.3. Схема и общий вид микроманометра с наклонной трубкой:
 1 – широкий сосуд; 2 – наклонная трубка; 3 – постамент; 4 – установочная стойка;
 5 – установка нуля; 6 – регулировочный цилиндр; 7 – регулировочный винт;
 8 – многоходовой кран

В данном приборе с изменением наклона трубки изменяются пределы измеряемых давлений. Чем меньше угол наклона α , тем меньше предел измерения и тем выше точность измерений при одной и той же шкале и рабочей жидкости. Однако угол наклона $\alpha < 15^\circ$ приводит к увеличению неточности показаний за счет размывания (вытягивания) мениска в измерительной трубке. Шкала микроманометра ММН градуируется в миллиметрах водяного столба для рабочей жидкости – спирта. Микроманометры данного типа выпускаются с классом точности 0,5 и 1,0.

Барометры ртутные предназначены для измерения атмосферного давления. Применение их в технике необходимо главным образом при определении абсолютного давления. Ртутные барометры бывают двух типов: чашечные и сифонные. Наиболее распространенными являются чашечные барометры. На рис. 3.4 показан ртутный чашечный барометр. Принцип действия барометра основан на уравнивании атмосферного давления давлением ртутного столба, заключенного в барометрической трубке. Погрешность считывания в этих приборах не превышает $\pm 0,1$ мм, что объясняется введением оптического устройства – нониуса, совмещаемого с границей мениска ртути. Во избежание влияния капиллярных сил на показания барометра диаметр их трубок должен быть не менее 8 мм.

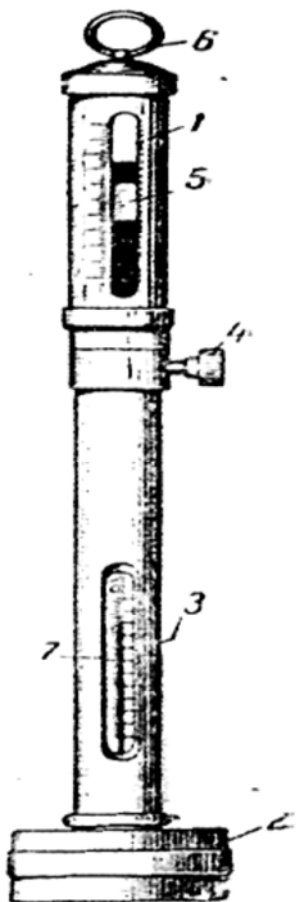


Рис. 3.4. Барометр

В барометре этого типа стеклянный сосуд и трубка помещены в металлическую оправу 3. В верхней части этой оправы имеется сквозная прорезь 1 для наблюдения поверхности мениска ртути. Вдоль прорези на оправе нанесены деления шкалы с учетом изменения уровня ртути в сосуде 2. В прорези оправы помещен специальный визир 5, снабженный нониусом, передвигаемый при помощи винта 4. Этим винтом осуществляется точная наводка визира на вершину мениска ртути, обеспечивая тем самым надлежащую точность отсчета. Барометр должен находиться в вертикальном положении, для чего он свободно подвешивается на кольце 6. Снаружи к прибору прикреплен термометр 7, по которому контролируется температура ртутного столба и шкалы барометра. Шкалы барометров градуируют в миллиметрах ртутного столба или в миллибарах. За меру барометрического давления, как известно, принимают высоту ртутного столба, выраженную в миллиметрах или миллибарах при 0 °С и нормальном ускорении силы тяжести.

В действительности же высота ртутного столба по барометру отсчитывается при иных значениях температуры и ускорения силы тяжести. Поэтому непосредственный отсчет по барометру необходимо корректировать, т. е. приводить его показания к нормальным условиям, пользуясь для этой цели формулой

$$h_n = h_0 \left[1 - (\beta - \alpha)t \right] \frac{g_\phi}{g},$$

где h_0 – высота ртутного столба, отсчитанная по барометру при температуре t ;

β – коэффициент расширения ртути;

α – коэффициент линейного расширения материала шкалы барометра.

Для точного определения барометрического давления по ртутному барометру необходимо также вводить поправки:

- на инструментальную погрешность прибора C_1 (указывается в паспорте прибора);
- температуру C_2 , определяемую в соответствии с формулой

$$C_2 = h(\beta - \alpha)t;$$

- ускорение свободного падения C_3 , определяемое в соответствии с формулой

$$C_3 = h_0 \left(\frac{g_{\Phi}}{g} - 1 \right).$$

4. ПРИБОРЫ ДАВЛЕНИЯ С УПРУГИМИ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Приборы давления этого типа основаны на использовании деформации или изгибающего момента упругих чувствительных элементов (УЧЭ), воспринимающих давление среды и преобразующих его в перемещение или усилие. Эти приборы применяют в различных отраслях техники для широкого диапазона измерения давления (от 50 Па до 1000 МПа). Они изготавливаются в виде манометров, вакуумметров, тягомеров, напорометров, тягонапорометров и мановакуумметров. Приборы давления с УЧЭ подразделяются на следующие типы:

- приборы давления прямого действия – *показывающие и самопишущие*, у которых перемещение центра или свободного конца УЧЭ, вызываемое действием давления, преобразуется в перемещение отсчетного устройства (стрелки) для показания или для показания и записи измеряемой величины на диаграммной бумаге;
- приборы давления прямого действия – *реле давления* (без отсчетных устройств), снабженные электроконтактами и предназна-

ченные в основном для сигнализации отклонения давления от заданного значения, а также для работы в схемах защиты, блокировки или позиционного регулирования;

- первичные приборы давления, *с отсчетными устройствами* или без них, снабженные *передающими преобразователями* с унифицированными выходными токовыми или пневматическими сигналами для дистанционной передачи информации. Приборы этого типа могут использоваться в системах автоматического регулирования и управления, а также подключаться к вторичным приборам и к вычислительной технике.

В зависимости от назначения приборы давления с упругими чувствительными элементами подразделяются на *образцовые* и *рабочие*.

Одной из основных характеристик упругого чувствительного элемента является зависимость перемещения его рабочей точки λ от действующей нагрузки p (давления или разности давлений). Статическая характеристика УЧЭ

$$\lambda = f(p)$$

в зависимости от его конструкции и способа нагружения может быть линейной или нелинейной.

Обычно предпочитают УЧЭ с линейной статической характеристикой, а в случае нелинейной характеристики для получения равномерной шкалы прибора применяются различные спрямляющие устройства. Важными параметрами, определяющими рабочие качества упругого чувствительного элемента, являются его жесткость и чувствительность – величина, обратная жесткости. Если статическая характеристика УЧЭ линейна, то жесткость равна отношению давления к соответствующему перемещению:

$$k = p/\lambda, \text{ Па/м.}$$

Чувствительность упругого элемента представляет собой величину, обратную жесткости:

$$S = \lambda/p, \text{ м/Па.}$$

Для обеспечения надежной работы упругочувствительного элемента необходимо, чтобы величина напряжений, возникающих в его материале под действием внешних и внутренних сил, не пре-

вышла предела упругости. Вследствие несовершенства упругих свойств реальных материалов статическая характеристика

$$\lambda = f(p)$$

чувствительного элемента при увеличении и уменьшении нагрузки в пределах упругих деформаций неоднозначна и образует так называемую петлю гистерезиса (рис. 4.1). Величина гистерезиса является важной характеристикой, так как он определяет погрешность прибора. Существенное влияние на гистерезис оказывают химический состав, структура материала и значение напряжений в материале чувствительного элемента.

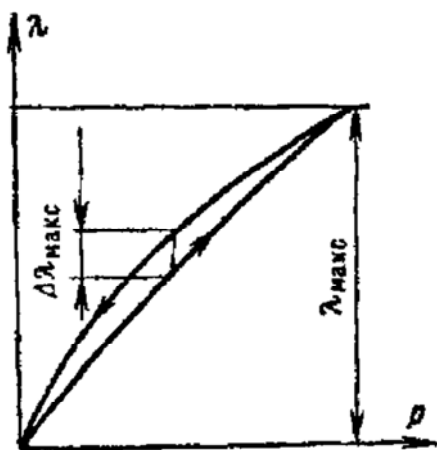


Рис. 4.1. Петля гистерезиса

Несовершенство свойств материала УЧЭ может влиять и на изменение его деформаций во времени при приложении одинаковых нагрузок. Такое явление называется *последствием*. Различают следующие виды последствий: упругое, пластическое и релаксацию. При упругом последствии упругие элементы после снятия напряжения в течение некоторого времени возвращаются в исходное состояние, в результате чего стрелка прибора не

сразу, но возвращается на нуль. Упругое последствие, складываясь с «чистым» гистерезисом, дает увеличение петли гистерезиса.

Стабильность характеристик упругого чувствительного элемента во времени может измениться вследствие пластической ползучести материала, которая может возникнуть при нормальной температуре и напряжениях, меньших предела упругости. Это связано с неоднородностью структуры материала и появлением в его микрообъемах остаточных напряжений при изготовлении. Пластическое поведение материала во времени проявляется в форме пластического последствия и релаксации.

Под *пластическим последствием* понимают явление, при котором некоторая часть деформации в чувствительном элементе сохраняется при полной его разгрузке по истечении любого интервала времени. Известно, что увеличение пластической деформации приводит к уменьшению упругой деформации, а вместе с тем – к уменьшению напряжений в материале чувствительного элемента. По истечении достаточно длительного времени напряжения в чувствительном элементе могут полностью исчезнуть. Ослабление напряжений с течением времени при условии постоянной деформации называется *релаксацией напряжений*. Интенсивная релаксация напряжений в упругом чувствительном элементе может быть причиной его выхода из строя и разрушения.

Для уменьшения релаксации и последствия чувствительные элементы при изготовлении подвергаются стабилизации – специальной технологической обработке, при которой пластическое течение материала заканчивается. Упругие чувствительные элементы изготавливаются из пластичных материалов, обладающих необходимой упругостью. К таким материалам относятся дисперсионно-твердеющие сплавы, бронзы Бр.Б2; Бр.Б2,5, сталь Н36ХТЮ и др.

В качестве упругих чувствительных элементов в приборах давления широко используются разного рода мембраны, мембранные коробки и блоки, трубчатые пружины и сильфоны.

Плоские мембраны изготавливаются из стали и бронзы и представляют собой круглые тонкостенные пластины постоянной толщины, заделываемые по краям в камеру приема импульса давления. Эти мембраны под действием равномерно распределенного давления прогибаются при наличии не только изгибных деформаций, но и растягивающих напряжений и вследствие этого имеют нелинейную статическую характеристику. При использовании плоских мембран в качестве рабочего участка обычно используется лишь небольшая часть возможного ее хода.

Плоские мембраны применяются главным образом в приборах давления специальных конструкций с пьезокварцевыми, емкостными, индуктивными и тензопреобразователями. Приборы с плоскими мембранами обладают малой инерционностью и могут быть использованы для измерения переменного давления с частотой его изменения до тысячи герц.

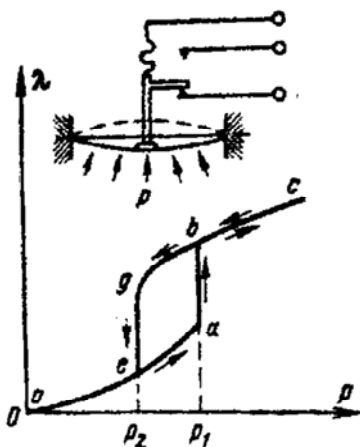


Рис. 4.2. Принцип работы выпуклой мембраны

Выпуклые мембраны (их еще называют «хлопающие») также изготавливаются из стали или бронзы и при изменении давления могут принимать два положения, переходя из одного в другое скачком. За счет таких своих свойств выпуклые мембраны используются в реле давления, в сигнализаторах давления при его отклонении от заданного. На рис. 4.2 сверху показан принцип работы выпуклой мембраны. При воздействии давления на мембрану ее прогиб λ на начальном участке статической характеристики плавно возрастает. После дальнейшего повышения

давления мембрана теряет устойчивость и скачком меняет свой прогиб (участок ab характеристики), при этом замыкая (размыкая) электрические контакты. Если повышать давление дальше, то прогиб мембраны снова будет плавно возрастать (участок bc характеристики). Если же уменьшать давление от p_1 до p_2 , то мембрана опять скачком возвратится в исходное состояние (участок ge характеристики).

Гофрированные мембраны и мембранные коробки. Гофрировка поверхности мембраны в виде кольцевых волн значительно повышает надежность ее работы и спрямляет статическую характеристику мембраны. Наиболее часто применяемые профили для гофрированных мембран: синусоидальный, трапецеидальный и пильчатый.

Одиночные гофрированные мембраны в качестве чувствительных элементов применяются довольно редко. Наибольшее распространение в приборах давления (тягометрах, напорометрах, дифманометрах) получили мембранные коробки, которые представляют собой две спаянные вместе гофрированные мембраны, а также мембранные блоки, состоящие из нескольких мембранных коробок.

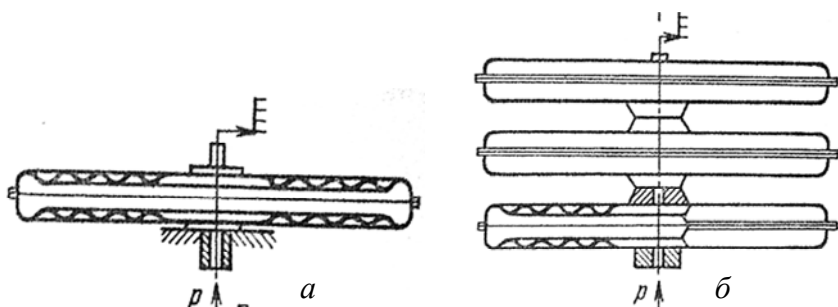


Рис. 4.3. Мембранная коробка (а) и мембранный блок из трех коробок (б)

Применение мембранных коробок помимо спрямления статической характеристики упругого элемента повышает и его чувствительность. Для защиты мембранных коробок от возможных перегрузок по давлению применяют специальные упоры, ограничивающие их деформацию. Увеличение глубины гофров приводит к практически линейной характеристике мембраны за счет большего сопротивления изгибу, а также к повышению жесткости мембраны. Влияние формы профиля на характеристику мембраны сравнительно невелико, поэтому для воздействия на характеристику изменяют глубину гофрировки или толщину материала. Форму профиля и число волн обычно выбирают из технологических или конструктивных соображений. В тех случаях, когда необходимо уменьшить жесткость на некотором участке характеристики мембраны, ей придают небольшую выпуклость.

Неметаллические мембраны. Кроме металлических мембран в приборах давления, измеряющих малые давления и разности давлений, применяют неметаллические, так называемые «вялые мембраны». Эти мембраны изготовляют из специальной прорезиненной ткани (капрон или шелк, покрытые бензомаслостойкой резиной) или пластмасс.

Неметаллические мембраны снабжаются жестким центром в виде металлических дисков, диаметр которых обычно составляет примерно 0,8 рабочего диаметра мембраны. Для обеспечения постоянства эффективной площади кольцевая часть мембраны выполняется с гофром.

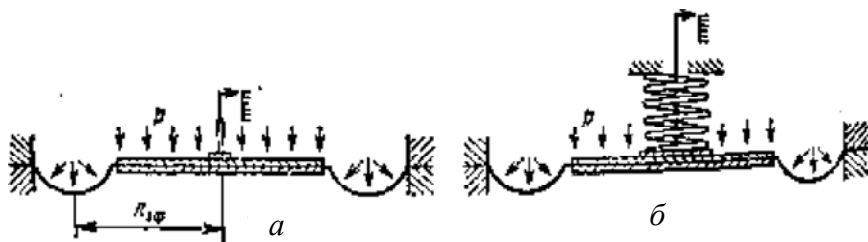


Рис. 4.4. Неметаллические мембраны с жестким центром:
a – свободная; *б* – нагруженная пружиной.

Сильфоны применяются в приборах давления (напорометрах, тягометрах и манометрах для измерения небольших величин давления – до 40 кПа), при измерении вакуумметрического давления – до 0,1 МПа, абсолютного давления – до 2,5 МПа, избыточного давления – до 60 МПа, разности давлений – до 0,25 МПа. Сильфоны представляют собой тонкостенную трубку с поперечной гофрировкой (рис. 4.5) и выдерживают давление на сжатие, в 1,5–2 раза большее, чем на растяжение.

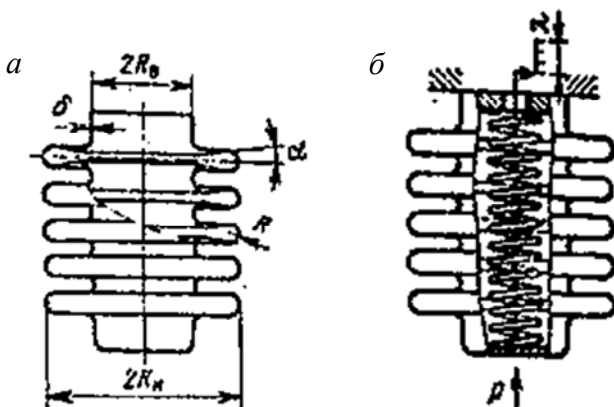


Рис. 4.5. Сильфоны бесшовные:
a – свободный; *б* – нагруженный

Жесткость сильфона зависит от его геометрических размеров, толщины стенки трубки, упругих свойств материала трубки, радиуса скругления гофра R и угла уплотнения гофра α . В случаях, когда

требуется увеличить жесткость сильфона, он снабжается цилиндрической винтовой пружиной (нагруженный сильфон). Эффективная площадь сильфона с достаточной точностью может быть рассчитана по следующей эмпирической формуле:

$$F_{\text{эф}} = \pi \left(\frac{R_{\text{н}} + R_{\text{в}}}{2} \right),$$

где $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{в}}$ – соответственно наружный и внутренний радиусы сильфона.

Статическая характеристика сильфонов линейна только для небольших перемещений и обладает высокой стабильностью и чувствительностью. В связи с этим сильфоны в приборах давления используются в режиме небольших деформаций.

Бесшовные сильфоны изготавливаются путем гофрировки цельных тонкостенных трубок методом механогидравлической опрессовки. На практике применяются также сварные сильфоны, которые изготавливаются путем сваривания листовых штампованных мембран.

Трубчатые пружины представляют собой изогнутую по дуге трубку с центральным углом $\gamma = 200\text{--}250^\circ$, эллиптического или плоскооувального сечения. Они называются пружиной или трубкой Бурдона. Один конец такой пружины закреплен неподвижно, а другой, свободный, закрыт пробкой и запаян. Свободный конец пружины соединен с механизмом показывающего прибора или с другим преобразователем. Схема пружины Бурдона приведена на рис. 4.6.

Именно такая форма сечения трубчатых пружин позволяет перемещаться свободному концу из-за деформации ее поперечного сечения пружины при подведении вовнутрь нее давления. Пружина круглого сечения практически нечувствительна к давлению, так как ее поперечное сечение не деформируется при воздействии давления.

Тонкостенные пружины Бурдона применяются для измерения избыточного и абсолютного давления до 6 МПа, а вакуумметрического – до 0,1 МПа. Для измерения больших давлений в диапазоне до 20–160 МПа применяются толстостенные пружины овального сечения.

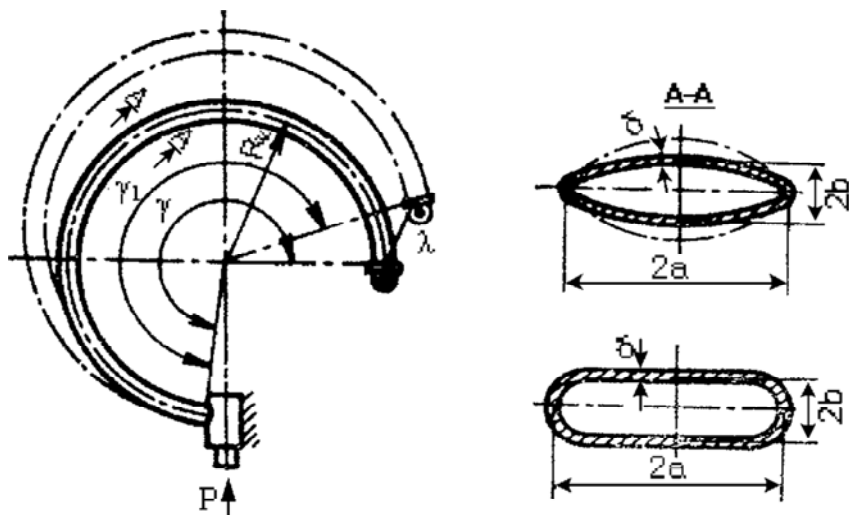


Рис. 4.6. Одновитковая трубчатая пружина Бурдона с различными поперечными сечениями

Трубчатая пружина тем чувствительнее, чем больше радиус ее кривизны R_k и чем меньше толщина δ . Чувствительность трубчатых пружин с сечениями, приведенными на рис. 4.6, зависит от соотношения осей поперечного сечения a/b .

Относительное изменение центрального угла тонкостенной пружины Бурдона в зависимости от подводимого к ней давления определяется по формуле

$$\frac{\Delta\gamma}{\gamma} = p \frac{1-\mu}{E} \frac{R_k}{b-\delta} \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) \frac{\alpha}{\beta + \chi^2},$$

где $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma$ – изменение центрального угла пружины под давлением;

μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль упругости материала пружины;

δ – толщина стенки пружины;

α и β – коэффициенты, зависящие от соотношения a/b ;

χ – «главный параметр» пружины Бурдона.

4.1. Приборы давления прямого действия

Приборы давления прямого действия используются для измерения давления в широком диапазоне его изменения – от нескольких миллиметров водяного столба до нескольких тысяч атмосфер. Применяют их как в лабораторных, так и в промышленных условиях. Они отличаются простотой конструкции, небольшими размерами, относительной дешевизной и простотой эксплуатации.

Мембранные напоромеры и тягомер. Эти приборы, широко применяемые в промышленности, служат для измерения небольших давлений и разрежений, а также незначительных разностей давлений. Например, в котельных установках, промышленных печах и ряде других случаев тягомерами измеряют тягу, а напоромерами – давление воздуха. Мембранные тягомеры и напоромеры изготавливают с профильной и концентрической шкалой. При этом их устройство принципиально одинаково, за исключением отдельных элементов передаточного механизма и формы корпуса. Приборы с профильной шкалой компактны, и их удобно монтировать в щитах управления.

На рис. 4.7 изображен напоромер, предназначенный для измерения давления, и его внутреннее устройство.

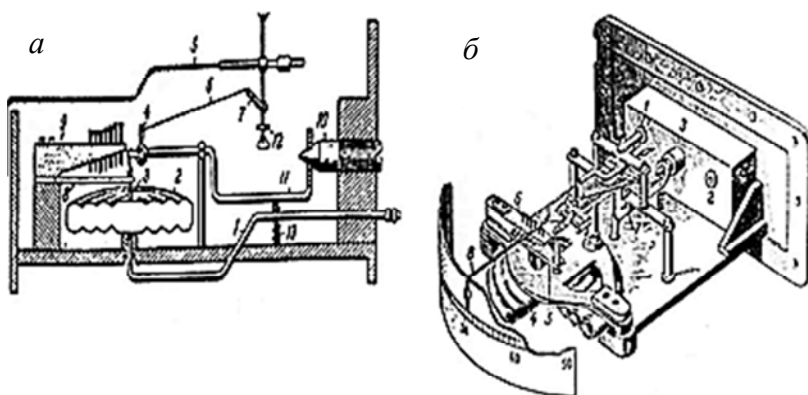


Рис. 4.7. Напоромер типа НПМ с горизонтальной профильной шкалой:
а – схема устройства; б – внутренний вид: 1 – трубка подвода давления;
2 – «дыхательное» отверстие; 3 – корректор нуля; 4 – мембранная коробка;
5 – плоская пружина; 6 – кронштейн с установочными винтами; 7 – спиральная пружина; 8 – стрелка

В качестве упругого элемента здесь используется мембранная коробка 2, состоящая из двух гофрированных мембран (рис. 4.7, а). Подвод давления измеряемой среды осуществляется по трубке 1. При изменении давления среды мембранная коробка прогибается, при этом ее объем либо увеличивается, либо уменьшается. Вследствие прогиба мембранной коробки штифт 3, припаянный в центре верхней мембраны, поворачивает коленчатый рычаг 4, который, в свою очередь, посредством тяги 6 и рычага 7 перемещает указательную стрелку 5. Для устранения мертвого хода оси стрелки предусмотрен спиральный волосок 10. Ход мембранной коробки непропорционален давлению. Поэтому для получения равномерной шкалы прибора он снабжается специальным приспособлением, состоящим из плоской пружины 8 и кронштейна 9 с регулировочными винтами. При подъеме пружина опирается на регулировочные винты, вследствие чего с увеличением давления уменьшается рабочая длина пружины, а отсюда увеличивается ее жесткость. Таким образом, измеряемое давление уравнивается действием упругих сил пружины и мембранной коробки.

Манометры, вакуумметры и мановакуумметры. В этих приборах в качестве упругих чувствительных элементов используются сильфоны и одновитковые трубчатые пружины. Сильфонные приборы применяются для измерения и записи вакуумметрических и небольших избыточных давлений, не превышающих 0,4 МПа. Рассмотрим устройство сильфонных приборов на примере самопишущего манометра типа МСС, схема которого показана на рис. 4.8. Сильфон 9 в целях его разгрузки снабжен винтовой пружиной 8, которая вместе с ним создает силу, противодействующую подводимому давлению. Давление среды подводится к штуцеру 11, соединенному трубкой с камерой 10. Под действием давления среды сильфон деформируется, и дно его поднимает шток 7.

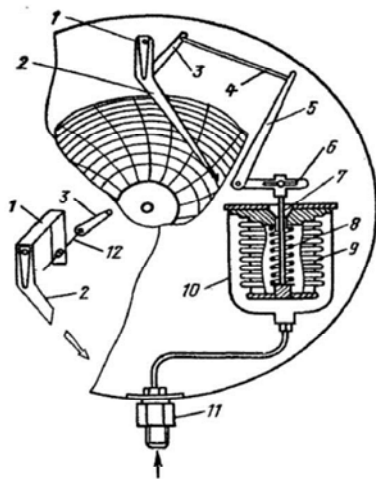


Рис. 4.8. Самопишущий манометр

Шток поворачивает рычаг 6, который посредством рычага 5, тяги 4 и рычага 3 поворачивает ось 12 и сидящий на ней П-образный рычаг 1, на котором расположено перо 2. Запись измеряемого давления производится на дисковой диаграмме. Диаграмма делает один оборот в сутки, привод диаграммы осуществляется синхронным электродвигателем или часовым механизмом.

Манометры этого типа выпускаются с верхними пределами измерений от 0,025 до 0,4 МПа. Показывающие и самопишущие сильфонные манометры выпускаются с классом точности 1,5, сильфонные вакуумметры и мановакуумметры – с классом точности 2,5.

Приборы с одновитковой трубчатой пружиной получили наибольшее распространение и применяются в широком интервале для измерения давления от 0,1 до 1000 МПа. Приборы с одновитковой трубчатой пружиной в зависимости от их назначения разделяются на рабочие и образцовые. Рабочие приборы, в свою очередь, подразделяются на приборы повышенной точности, контрольные и технические. К приборам, предназначенным для измерения с повышенной точностью, относятся манометры типа МТИ и вакуумметры типа ВТИ с классами точности 0,6 и 1 соответственно, а также мановакуумметры типа МТИ класса точности 1. Контрольные показывающие манометры и вакуумметры, предназначенные для поверки технических приборов давления по месту их установки, имеют класс точности 0,5. Технические манометры, вакуумметры и мановакуумметры выпускаются с классами точности 1,0; 1,6; 2,5 и 4. Образцовые же приборы давления выпускаются типов МО (манометры), ВО (вакуумметры) и имеют класс точности 0,16; 0,25 и 0,4. Верхний предел шкалы образцовых манометров типа МО составляет 0,1–60 МПа.

В приборах с одновитковой трубчатой пружиной перемещение ее свободного конца передается на стрелку с помощью секторного передаточного механизма. Этот механизм позволяет использовать концентрическую шкалу с углом в 270°.

Как следует из рис. 4.9, один конец трубчатой пружины 1 закреплен в держателе 2, скрепленном с корпусом манометра. Внизу держатель снабжен шестигранной головкой и радиальным штуцером 3 с резьбой для присоединения к объекту измерения. Иногда приборы давления изготавливаются с осевым штуцером, расположенным сзади корпуса прибора. Свободный конец пружины, закрытый пробкой с серьгой, соединен с секторным передаточным механиз-

мом, состоящим из поводка 4, сектора 5 и трубки 6, на оси которой укреплена стрелка 7. Спиральная пружина 8 служит для прижима зубцов трибки к зубцам сектора, устраняя тем самым мертвый ход. Под влиянием измеряемого избыточного давления пружина разгибается и тянет за собой поводок, который поворачивает зубчатый сектор и соответственно трибку со стрелкой. Передвигающаяся вдоль шкалы стрелка показывает значение измеряемого избыточного давления. Перемещение свободного конца пружины, а следовательно, и угол поворота стрелки практически пропорциональны измеряемому давлению, поэтому шкала таких приборов равномерна. Регулировка хода стрелки осуществляется изменением длины плеча зубчатого сектора со стороны поводка.

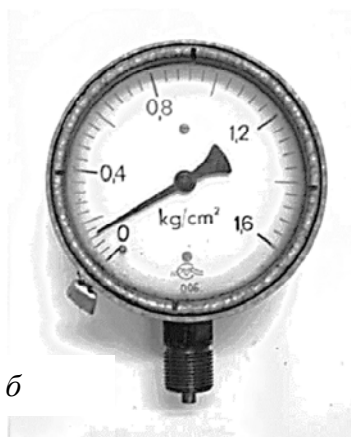
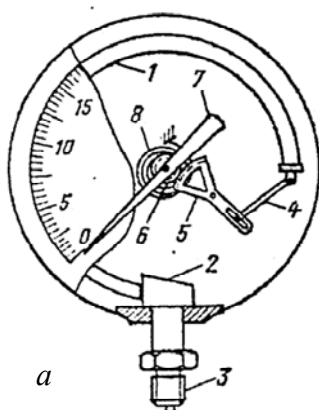


Рис. 4.9. Манометр с одновитковой трубчатой пружиной Бурдона:
а – схема устройства; *б* – общий вид

Вакуумметры с одновитковой трубчатой пружиной по своему устройству аналогичны манометру, рассмотренному выше. Если к штуцеру прибора подвести разрежение, то трубчатая пружина будет скручиваться, и ее свободный конец будет перемещаться, но вниз. При этом стрелка вакуумметра, в отличие от стрелки манометра, будет двигаться против часовой стрелки. Для того чтобы движение стрелки было обычным (по часовой стрелке), конец трубчатой пружины закрепляют с правой стороны держателя.

Мановакуумметры с одновитковой трубчатой пружиной отличаются от манометров шкалой, которая у них является двусторонней. Часть шкалы, расположенная слева от нуля, служит для измерения вакуума в диапазоне от 0,1 до 0 МПа, а справа от нуля – для измерения избыточного давления с верхними пределами от 0,06 до 2,4 МПа.

Устройство приборов давления с повышенной точностью измерения и образцовых ничем не отличается от обычных приборов с пружиной Бурдона. Высокая точность этих приборов, особенно образцовых, по сравнению с техническими приборами достигается за счет тщательного изготовления и применения материалов высокого качества.

При выборе шкалы прибора с одновитковой трубчатой пружиной необходимо, чтобы максимальное значение рабочего избыточного давления составляло не более $3/4$ верхнего предела измерения при постоянном давлении и не более $2/3$ верхнего предела измерения – при переменном.

Электроконтактные приборы давления используются для целей сигнализации отклонения давления от заданной величины, технологической защиты (блокировки) различных аппаратов и агрегатов по давлению, а также в схемах дискретно-импульсного управления при автоматизации технологических процессов. Среди приборов такого типа различают электроконтактные приборы давления (манометры, вакуумметры) типа ЭКМ, а также реле давления типа РД. Электроконтактные приборы давления отличаются от реле давления наличием отсчетного устройства (шкалы) и могут быть использованы одновременно для целей измерения и сигнализации. Реле давления используются только для целей сигнализации и являются «слепыми» приборами.

Электроконтактные приборы давления изготавливаются в виде рассмотренных уже манометров, вакуумметров и мановакуумметров.

В конструкции электроконтактного манометра (рис. 4.10) предусмотрена контактная группа, состоящая из двух переменных контактов 1 и 2 (задающие контакты) и контакта, расположенного на стрелке прибора 3. Контакты прибора монтируют на специальных стрелках, помещенных под стеклом прибора. Установка контактов может быть произведена на любое деление шкалы прибора вращением винта в головке, находящейся на наружной поверхности стекла. Если давление среды в измеряемом пространстве уменьшится и достигнет того минимального значения шкалы, на которое установ-

лен контакт 1, стрелка замкнет цепь и включит соответствующую лампочку. Если же давление увеличится, то стрелка замкнет контакт 2, т. е. цепь другой лампочки. Вместо световой сигнализации или параллельно с ней может быть применена звуковая сигнализация либо подключено любое электрическое исполнительное устройство. Для питания схемы контактного манометра можно использовать постоянный (220 В) или переменный (380 В) ток. Разрывная мощность контактов манометра составляет 10 Вт при максимальном токе 1 А.

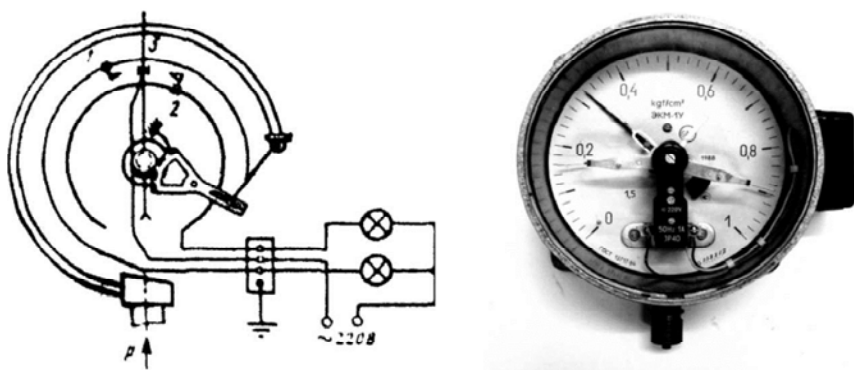


Рис. 4.10. Электроконтактный манометр типа ЭКМ, принципиальная схема и внешний вид

Электроконтактные манометры ЭКМ выпускаются с верхним пределом измерения от 0,1 до 160 МПа. Мановакуумметры типа ЭКМ выпускаются с верхним пределом измерения вакуумметрического давления до 0,1 МПа, а избыточного – от 0,1 до 2,5 МПа. Приборы типа ЭКМ имеют класс точности 1,5; 2,5 и 4,0.

Для применения электроконтактных приборов давления во взрывоопасных условиях эксплуатации существуют модификации этих приборов типа ВЭ-16РБ.

Среди *реле давления* широкое распространение получили сигнальные реле типа РДС, схема которого представлена на рис. 4.11.

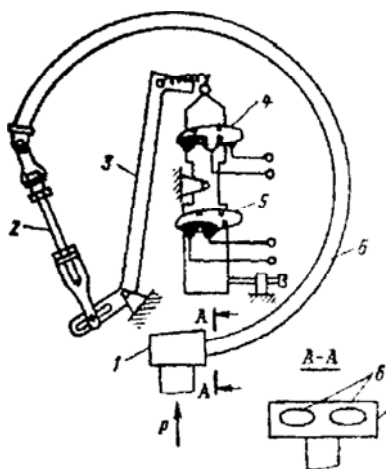


Рис. 4.11. Сигнальное реле давления

В этом реле в качестве упругого чувствительного элемента используются две одновитковые трубчатые пружины *б*, впаянные в общий держатель *1* и подключенные к одному штуцеру. Перемещение свободных концов этих пружин с помощью тяги *2* и рычага *3* передается контактному устройству, состоящему из двух переключателей (нормально замкнутого *5* и нормально разомкнутого *4*). Регулировка настройки срабатывания реле осуществляется при помощи тяги и винта. Диапазон срабатывания реле по давлению составляет от 0,5 до 2,5 МПа с погрешностью $\pm 0,025$ МПа. Разрывная мощность контактов достигает 300 Вт при токе около 1 А.

4.2. Приборы давления с преобразователями

Приборы давления с преобразователями или так называемые первичные приборы давления получили широкое применение в различных отраслях промышленности для дистанционного измерения избыточного, вакуумметрического и абсолютного давления газа и жидкостей, неагрессивных по отношению к сплавам на медной основе и углеродистым сталям. Приборы такого типа особенно необходимы, когда по условиям технологического процесса необходимо централизовать контроль за работой оборудования, находящегося далеко от поста управления.

Первичные приборы давления применяются в комплекте со вторичными приборами и автоматическими регуляторами, а приборы с унифицированным выходным сигналом постоянного тока используются также и с вычислительными машинами при создании автоматизированных систем. В качестве основных преобразователей в таких приборах давления используются электрические (резистивные и индуктивные), а также пневматические преобразователи.

Принцип действия этих приборов такой же, как и пружинных приборов давления, рассмотренных выше. Отличительной же особенностью является наличие в конструкции прибора соответствующего приспособления для преобразования давления или разрежения в электрический или пневматический сигнал. Одна из систем электрической дистанционной передачи показаний, использующая резистивный преобразователь, приведена на рис. 4.12, *а*.

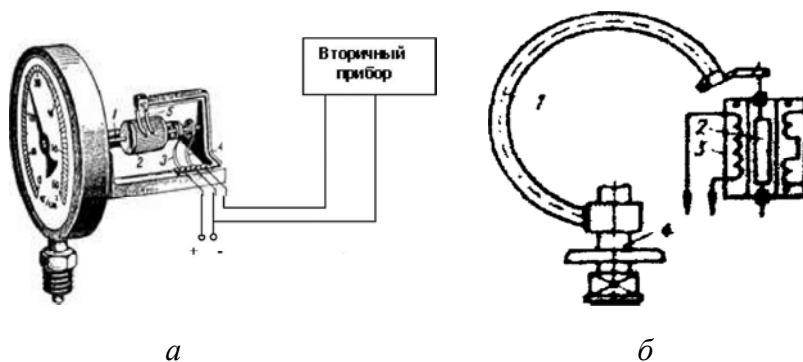


Рис. 4.12. Манометры:
а – с реостатным преобразователем; *б* – с индуктивным преобразователем (типа МЭД)

У данного прибора на оси *1* манометра укреплен датчик *2*, представляющий собой реостат, намотанный на цилиндр. В качестве измерительного вторичного прибора может быть использован, например, магнитоэлектрический логометр. Напряжение на реостат подается через пружинные контакты *3* и *4*, а сигнал снимается через щетку *5*. Показания логометра зависят от соотношения токов, которое определяется соотношением сопротивлений ветвей реостата. Последнее зависит от угла поворота датчика, совпадающего с углом поворота стрелки манометра. Это позволяет проградуировать логометр в единицах давления.

Кроме датчиков этого типа применяются манометры с индуктивными преобразователями типа МЭД, схема которого приведена на рис. 4.12, *б*. Действие этого прибора основано на использовании деформации одновитковой трубчатой пружины *1*, свободный конец которой связан с сердечником *2* дифференциально-трансформаторного преобразователя *3*. Изменение положения сердечника вы-

зывает изменение взаимной индукции между обмотками трансформатора и, следовательно, изменение сигнала на выходе прибора. Приборы типа МЭД предназначены для измерения и непрерывного преобразования избыточного или вакуумметрического давления в выходной унифицированный сигнал переменного тока. Они изготавливаются с отсчетными устройствами или без них в следующих модификациях: манометры избыточного давления с верхними пределами измерения от 0,1 до 160 МПа; вакуумметры с пределом 0,1 МПа; мановакуумметры с пределами измерения вакуумметрического давления до 0,1 МПа и избыточного – от 0,06 до 2,4 МПа.

Приборы давления электрические в настоящее время получили достаточно широкое распространение. Эти приборы позволяют точно измерять быстропеременные давления в большом динамическом диапазоне.

В основу принципа работы электрических манометров положены различные физические явления, например, изменение сопротивления проводников при воздействии внешнего давления, возникновение электростатических зарядов при деформации некоторых кристаллов в определенном направлении, изменение электрической емкости, явление индукции и т. д. В состав этих приборов в обязательном порядке входят соответствующие электрические преобразователи с унифицированным токовым выходом.

Пьезоэлектрические манометры. Действие их основано на использовании пьезоэлектрического эффекта, наблюдаемого у ряда кристаллов (кварца, турмалина, сегнетовой соли и др.). Пьезоэлектрические манометры, использующие в качестве чувствительного элемента кристаллы кварца (SiO_2 – двуокись кремния), нашли наибольшее практическое применение по сравнению с индикаторами из других кристаллов благодаря существенным достоинствам кварца, который негигроскопичен, обладает большой механической прочностью, хорошими изоляционными качествами и независимостью пьезоэлектрических свойств от температуры в интервале 20–400 °С.

Пьезокварцевые манометры, позволяющие измерять давление до 100 МПа и выше, широко применяются при измерении быстропеременных давлений. При этом чем быстрее протекает исследуемый процесс, тем достовернее данные измерения. Практически пьезоэлектрический эффект можно считать безынерционным и достаточно стабильным.

Устройство датчика пьезокварцевого манометра с продольным пьезоэффектом схематично показано на рис. 4.13. В корпусе датчика

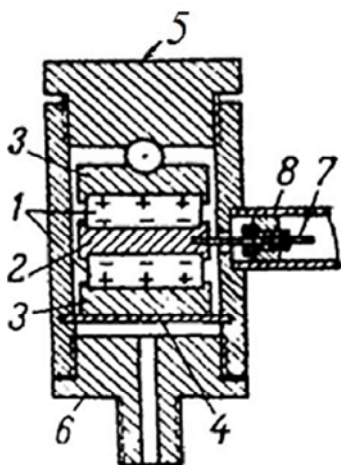


Рис. 4.13. Устройство датчика пьезокварцевого манометра

расположены две кварцевые пластины 1, которые обращены друг к другу сторонами одинаковой полярности. Эти стороны кварцевых пластин прилегают к металлической контактной пластине 2. Вторые стороны кварцевых пластин прилегают к металлическим опорам 3 и через них электрически замыкаются на корпус датчика. Металлические опоры вместе со столбиком из кварца зажимаются между металлической мембраной 4 и гайкой 5. Шарик, находящийся между гайкой 5 и верхней опорой, способствует равномерному распределению давления на поверхности кварца. Нижняя гайка 6 с каналом служит для соединения датчика с объектом измерения. При измерении давления положительный заряд, появляющийся на гранях кварцевых пластин, отводится на корпус, а отрицательный заряд с граней пластин снимается контактной пластиной 2 и с помощью провода 7 подается на измерительное устройство. Диэлектрическая втулка, установленная в канале 8, изолирует провод от корпуса датчика.

Чувствительность датчика обычно повышают путем увеличения активной площади мембраны, применения большего числа последовательно включенных кварцевых пластин или же применением удлиненной кварцевой пластины, работающей с использованием поперечного пьезоэффекта.

Принцип действия *манометров сопротивления* основан на изменении электрического сопротивления первичных преобразователей при действии на них внешнего давления. Среди этих манометров можно выделить две группы приборов – приборы с упругими чувствительными элементами и без них.

В манометрах сопротивления с упругими чувствительными элементами в качестве преобразователя давления используются тензо-

датчики, закрепляемые на чувствительном элементе. Тензодатчик выполняется из нескольких витков тонкой манганиновой проволоки, уложенной в один слой на плоской поверхности. Деформации чувствительного элемента, вызываемые изменениями давления, за счет растяжения проволоки изменяют сопротивление тензодатчика пропорционально действующему давлению.

В манометрах сопротивления без упругих чувствительных элементов применяются вещества, меняющие свое электрическое сопротивление при непосредственном воздействии на них внешнего давления. К числу таких веществ относятся, например, угольный порошок, платина, константан, манганин и ряд других. На практике отдается предпочтение манганину, так как он имеет линейную зависимость электрического сопротивления от давления вплоть до давления в 3000 МПа, а также обладает малым температурным коэффициентом сопротивления. К недостаткам манганина можно отнести малое изменение сопротивления от давления.

Для измерения изменения сопротивления в приборах рассматриваемого типа используются автоматические мосты, а при более точных измерениях – потенциометры. Все манометры сопротивления требуют индивидуальной градуировки.

В настоящее время все больше применяются современные общепромышленные электрические преобразователи давления. Это интеллектуальные, со встроенным микропроцессором, интегральные преобразователи с цифровым интерфейсом. Они обладают свойствами диагностики и конфигурирования на расстоянии (установка нуля и диапазона шкалы, выбор технических единиц, ввод данных для идентификации и физического описания датчика и т. п.), обеспечивают более высокое соотношение измеряемых диапазонов, улучшенную температурную компенсацию, повышенную точность измерения.

На наиболее важных и ответственных объектах (например, на АЭС) широко используются приборы для измерения давления «Сапфир-22» (Россия) и их аналоги «Сапфир-М» (Украина), в которых в качестве чувствительного элемента служит сапфировая мембрана с напыленными полупроводниковыми сопротивлениями, рис. 4.14 и 4.15.



Рис. 4.14. Общий вид измерительных преобразователей «Сапфир-22» и «Сапфир-М»

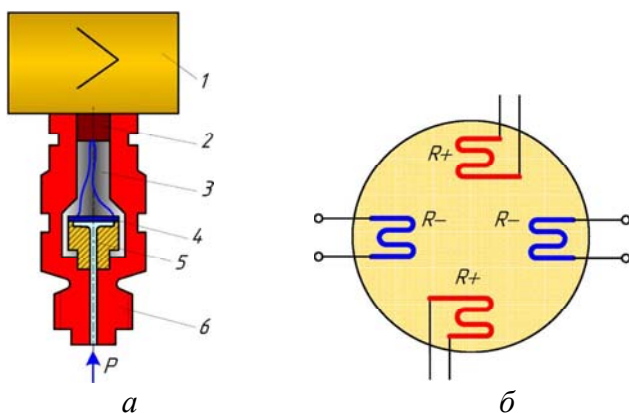


Рис. 4.15. Первичные измерительные преобразователи «Сапфир-22»: *а* – конструктивная схема преобразователя для измерения избыточного давления; *б* – принципиальная схема размещения тензорезисторов на поверхности сапфировой мембраны

Тензопреобразователь 4 (рис. 4.15, *а*) расположен внутри корпуса 6. Измеряемое давление подаётся в камеру 5. Электрический сигнал с тензопреобразователя подаётся в электронный блок 1 через гермоввод 2 в полости 3.

У размещённых радиально вблизи края мембраны тензорезисторов с ростом давления сопротивление снижается, а у размещённых перпендикулярно радиусу – увеличивается, рис. 4.15, *б*.

Содержание

Введение.....	3
1. Общие сведения и единицы измерения давления.....	4
2. Классификация средств измерения давления.....	6
3. Жидкостные приборы давления.....	9
4. Приборы давления с упругими чувствительными элементами.....	15

Учебное издание

КУЛЕБЯКИН Виталий Васильевич

**МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ**

Учебно-методическое пособие
для студентов специальности 1-37 03 02
«Кораблестроение и техническая эксплуатация водного транспорта»

Редактор *Т. Н. Микулик*
Компьютерная верстка *А. Г. Занкевич*

Подписано в печать 09.10.2015. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 2,09. Уч.-изд. л. 1,64. Тираж 100. Заказ 1019.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.