

Лекция №5 ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Учебные вопросы:

1. Общие сведения об измерении давления. Классификация средств измерения давления.
2. Жидкостные манометры.
3. Деформационные манометры.
4. Грузопоршневые манометры.
5. Измерительные преобразователи давления.
6. Особенности эксплуатации и монтажа средств

Общие сведения об измерении давления. Классификация СИ давления

Давлением называется отношение силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности. **Давление** — одна из основных величин, определяющих термодинамическое состояние веществ и ход технологических процессов.

Различают следующие виды давления: *атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуум (разрежение)*.

Атмосферное (барометрическое) давление — это давление, создаваемое массой воздушного столба земной атмосферы.

Абсолютное давление отсчитывается от абсолютного нуля, за который принимается давление внутри сосуда, из которого полностью откачан воздух. **Избыточное** давление представляет собой разность между абсолютным и барометрическим давлениями, а **вакуум {разрежение}** — разность между барометрическим и абсолютным давлением.

В Международной системе единиц (СИ) за единицу давления принят **паскаль (Па)** — давление, создаваемое силой в 1 ньютон (Н), равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м² и направленной нормально к ней. В технической системе единиц (МКС) давление выражается в килограммах силы на квадратный сантиметр (кгс/см²) и килограммах силы на квадратный метр (кгс/м²).

Единица кгс/см² получила название *техническая*, или *метрическая атмосфера (ат)*.

Существуют также такие **внесистемные единицы** измерения давления, как **бар, миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.), миллиметр водного столба (мм вод. ст.)**, а также **физическая**, или **нормальная**, атмосфера (атм), которая эквивалентна **760 мм рт. ст.**

В качестве СИ давления используются как **измерительные приборы**, так и **измерительные преобразователи**.

Приборы в зависимости от измеряемого давления делятся: на **манометры** (для измерения избыточного давления); **барометры** (для измерения атмосферного давления); **вакуумметры** (для измерения разрежения); **мановакуумметры** (для измерения избыточного давления и разрежения); **напоромеры и тягомеры** (для измерения малых давлений); **дифференциальные манометры**, или **дифманометры** (для измерения разности давлений).

По принципу действия приборы для измерения давления подразделяются на жидкостные, деформационные, электрические и грузопоршневые. Измерительные преобразователи давления в зависимости от используемого в них физического эффекта могут быть **тензорезисторными, пьезоэлектрическими, емкостными, резонансными, волоконно-оптическими, гальваномagnetными, акустическими** и др.

Наибольшее распространение получили тензорезисторные и емкостные преобразователи.

Жидкостные манометры

В жидкостных манометрах измеряемое давление уравнивается гидростатическим давлением столба рабочей жидкости, высота которого будет являться мерой измеряемого давления. В **качестве рабочей (манометрической) жидкости** применяются **дистиллированная вода, этиловый спирт, трансформаторное масло**. Эти манометры предназначены для измерения *избыточного давления* до $0,1$ МПа, разрежения и разности давлений. Жидкостные манометры используются в основном в качестве образцовых приборов для лабораторных и технических измерений.

В зависимости от конструкции сосуда с рабочей жидкостью жидкостные манометры могут быть **U-образные (двухтрубные)** и **чашечные (однотрубные)** с **вертикальной или наклонной трубкой**.

U-образный манометр представляет собой изогнутую в виде латинской буквы U стеклянную трубку, заполненную до половины рабочей жидкостью.

Трубка закрепляется вертикально на твердом основании. При измерении давления или разрежения один конец трубки оставляют открытым в атмосферу, а другой соединяют с объектом измерения; при измерении разности давлений их подводят к обоим концам трубки.

В **чашечных (однотрубных) манометрах** одна из трубок заменена широким сосудом, сообщающимся с измерительной стеклянной трубкой (вертикальной или наклонной). Площадь сечения сосуда значительно больше, чем площадь сечения измерительной трубки. При измерении давления или разности давлений большее из них подается в сосуд, а меньшее — в измерительную трубку. Показания манометра при измерениях определяются по длине столбика рабочей жидкости в трубке.

Деформационные манометры

Принцип действия деформационных манометров основан на упругой деформации чувствительных элементов под действием измеряемого давления. Благодаря высокой точности, простоте конструкции, надежности и низкой стоимости деформационные манометры получили широкое распространение в промышленности для измерения давления, разрежения и разности давлений. Они выпускаются **показывающими, регистрирующими.**

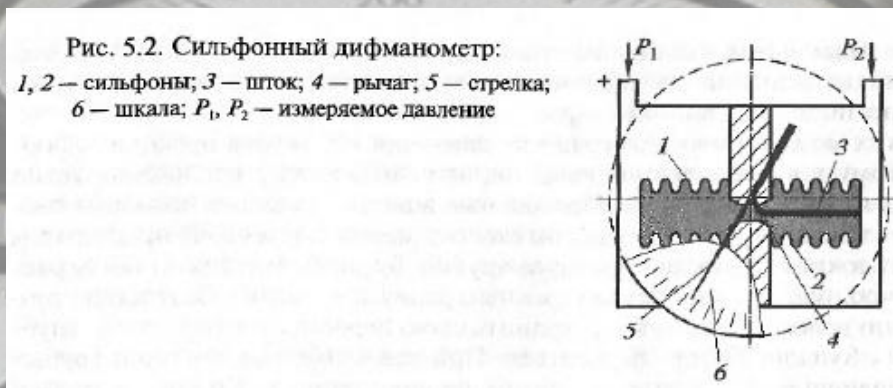
В качестве чувствительных элементов в деформационных манометрах применяют **трубчатые пружины, сильфоны и мембраны.**

Трубчатая пружина (манометрическая пружина, или трубка Бурдона) представляет собой упругую криволинейную металлическую полую трубку, один конец которой имеет возможность перемещаться, а другой жестко закреплен (рис. 5.1, а). Трубка в свободном состоянии в сечении имеет форму эллипса (разрез Л—А на рис. 5.1, б). При повышении давления внутри трубки она начинает раскручиваться. Это связано с тем, что под действием давления трубка «округляется», т.е. малая ось эллипса увеличивается, в то время как длина пружины остается неизменной. Под действием измеряемого давления $P_{тм}$ трубка Бурдона деформируется в поперечном сечении



Манометр с трубчатой пружиной (рис. 5.1, в) состоит из трубчатой пружины 1, один конец которой впаян в отверстие держателя 2, а другой конец наглухо запаян и несет на себе тягу 3. Полость пружины связана с измеряемой средой через канал в держателе. Перемещение свободного конца пружины передается зубчатому сектору 4 и шестерне 5, на оси которой насажена стрелка 6 прибора для отсчета показаний на шкале 7. Прибор устанавливается на технологическом объекте с помощью штуцера 8. Верхний предел измерения таких манометров 103 МПа.

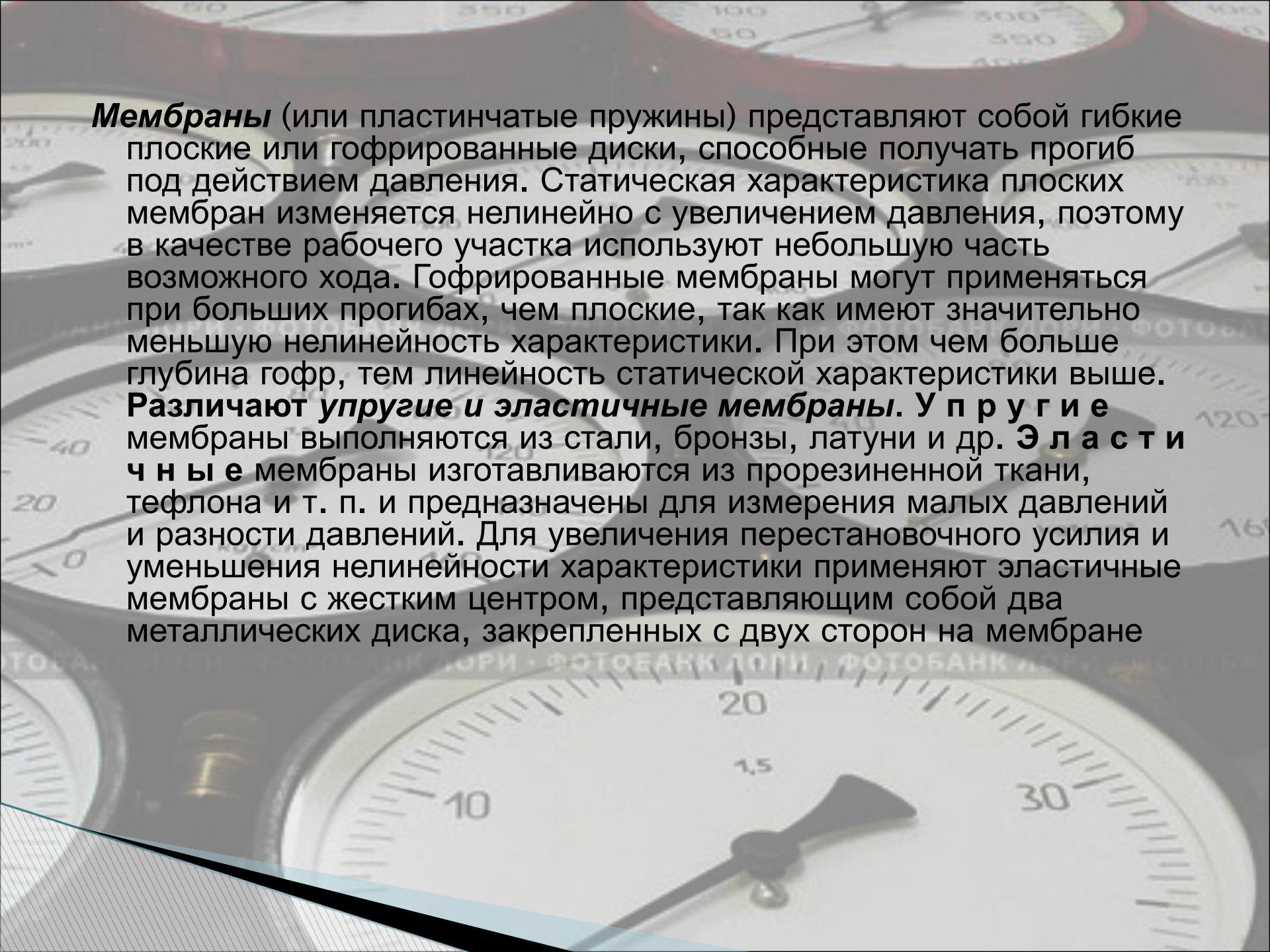
Сильфон представляет собой тонкостенную трубку с кольцевыми гофрами на боковой поверхности. Его упругость определяется материалом и толщиной стенки, числом гофр и их кривизной. Сильфоны изготавливают из бронзы, нержавеющей стали и т.д. Схема сильфонного дифманометра показана на рис. 5.2.



Под действием разности давлений сильфон 1, расположенный в плюсовой камере дифманометра, сжимается, и кремнийорганическая жидкость, заполняющая внутреннюю полость сильфона 1, частично вытесняется во внутреннюю полость сильфона 2, находящегося в минусовой камере дифманометра. При этом перемещается шток 3, жестко соединенный с дном сильфона 2. Со штоком соединен конец рычага 4, на который насажена стрелка прибора 5 для отсчета показаний по шкале 6. Для увеличения жесткости сильфонов внутри них могут быть установлены винтовые пружины.

Сильфоны более чувствительны к изменению давления, чем трубчатые пружины. Поэтому сильфонные манометры применяют для измерения сравнительно небольших разрежений и давлений.

Верхний предел измерений сильфонных манометров 0,4 МПа. Сильфоны также применяются в качестве гибких соединений трубопроводов, компенсаторов температурных удлинений, упругих разделителей сред и т. п.



Мембраны (или пластинчатые пружины) представляют собой гибкие плоские или гофрированные диски, способные получать прогиб под действием давления. Статическая характеристика плоских мембран изменяется нелинейно с увеличением давления, поэтому в качестве рабочего участка используют небольшую часть возможного хода. Гофрированные мембраны могут применяться при больших прогибах, чем плоские, так как имеют значительно меньшую нелинейность характеристики. При этом чем больше глубина гофр, тем линейность статической характеристики выше.

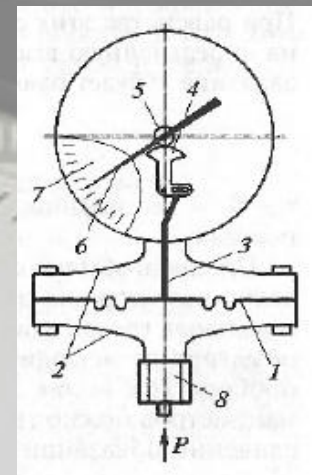
Различают упругие и эластичные мембраны. Упругие мембраны выполняются из стали, бронзы, латуни и др. **Эластичные** мембраны изготавливаются из прорезиненной ткани, тефлона и т. п. и предназначены для измерения малых давлений и разности давлений. Для увеличения перестановочного усилия и уменьшения нелинейности характеристики применяют эластичные мембраны с жестким центром, представляющим собой два металлических диска, закрепленных с двух сторон на мембране

В мембранном манометре (рис. 5.3) мембрана 1 зажимается или приваривается по краю между двумя фланцами 2. Давление, действующее на мембрану, вызывает ее прогиб, в результате которого изогнутый шток 3 совершает вертикальное перемещение. Перемещение штока передается зубчатому сектору 4 и шестерне 5, на оси которой насажена стрелка 6 прибора для отсчета показаний по шкале 7. Прибор устанавливается на технологическом объекте с помощью штуцера 8. В результате кольцеобразного крепления мембраны менее восприимчивы к вибрациям по сравнению с трубчатыми пружинами, однако погрешность показаний при изменениях температуры у них больше. Благодаря опорам для мембран достигается повышенная стойкость к перегрузкам. Покрываются или фольга, наносимые на поверхность мембран, обеспечивают защиту от коррозионных измеряемых сред. Широкие соединительные отверстия или открытые соединительные фланцы, а также возможности по промывке делают мембраны особенно пригодными при работе с высоковязкими, загрязненными или кристаллизующимися веществами.

Верхний предел измерений мембранных манометров 2,5 Мпа

Рис. 5.3. Мембранный манометр:

- 1 — гофрированная мембрана; 2 — фланцы; 3 — шток;
- 4 — зубчатый сектор; 5 — шестерня; 6 — стрелка; 7 —
- шкала; 8 — штуцер; P — измеряемое давление__



Грузопоршневые манометры

Принцип действия грузопоршневых манометров основан на уравнивании измеряемого давления калиброванным грузом, действующим на поршень. Они применяются для измерения давления

до 103 МПа, а также для градуировки и поверки манометров других типов.

Грузопоршневой манометр (рис. 5.4) имеет грузовую и поршневую части. Грузовая часть состоит из колонки 1, в центральной части которой имеется полированный цилиндрический канал, в который вставляется поршень 2. Поршень в верхней части имеет тарелку 3, на которую накладываются контрольные грузы 4. Канал колонки сообщается с горизонтальным каналом 5, который соединен со штуцерами 6 и 7, бачком с рабочей жидкостью 8 и поршневой частью манометра. Поршневая часть состоит из цилиндра 9 с поршнем 10, шток которого выполнен в виде винта со штурвалом 11. Вентили 12... 15 служат для перекрытия соответствующих каналов. Полость системы заполнена рабочей жидкостью (трансформаторным маслом). В штуцер 6 устанавливается поверяемый манометр 16. Давление в системе

изменяют, перемещая поршень 10 с помощью штурвала 11 (при этом вентиль 15 закрыт). На поршень 2, свободно перемещающийся в канале колонки 1, действуют две противодействующие силы: сила, создаваемая давлением жидкости, и сила тяжести поршня и грузов

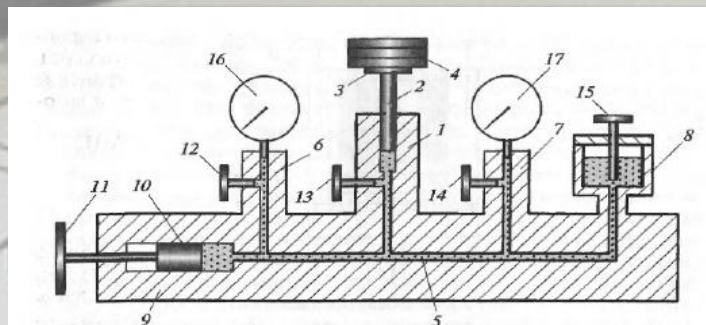
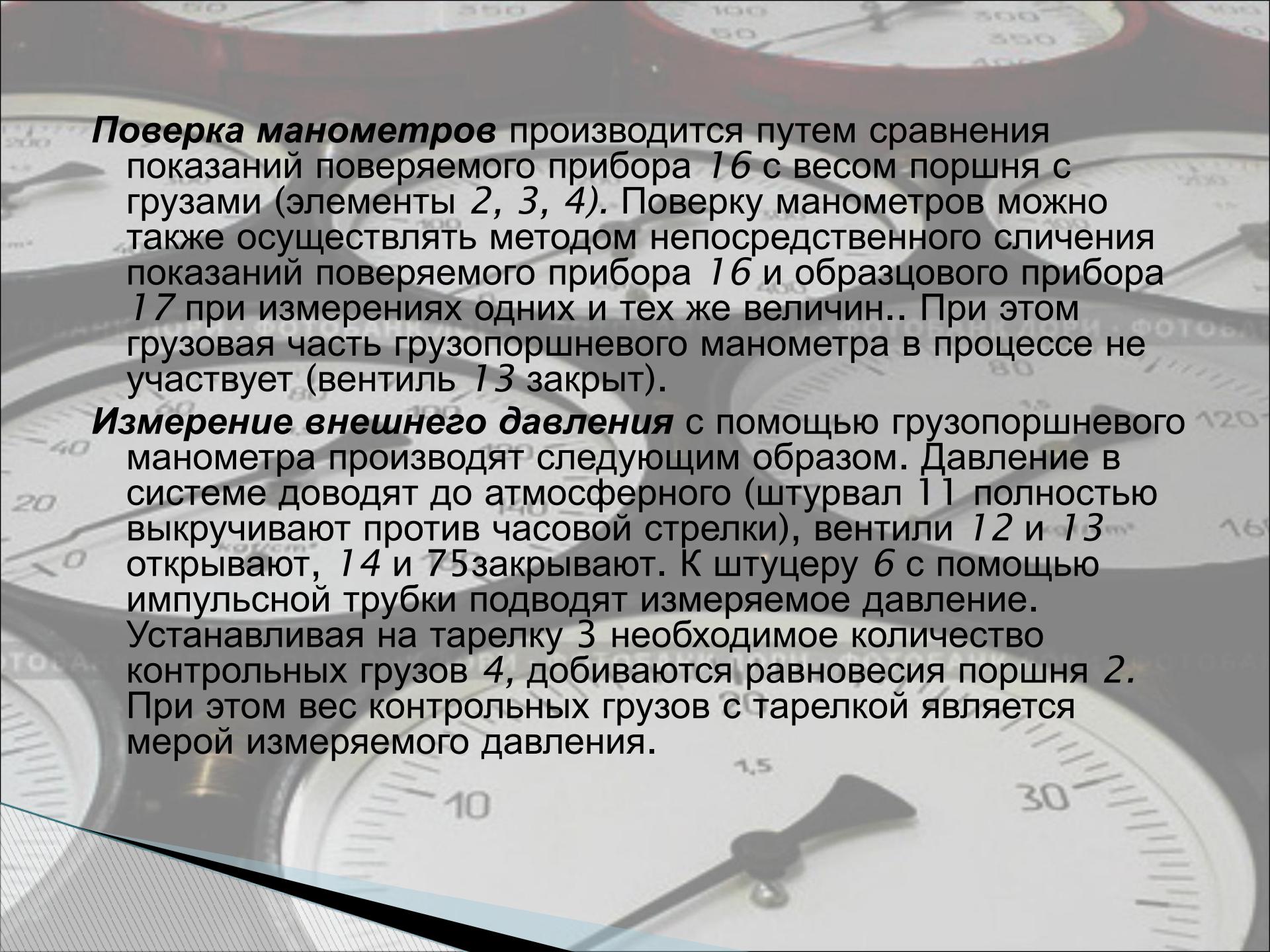


Рис. 5.4. Грузопоршневой манометр:

1 — колонка; 2 — поршень; 3 — тарелка; 4 — контрольные грузы; 5 — горизонтальный канал; 6, 7 — штуцеры; 8 — бачок с рабочей жидкостью; 9 — цилиндр; 10 — поршень; 11 — штурвал; 12...15 — вентили; 16 — поверяемый манометр; 17 — образцовый манометр



Поверка манометров производится путем сравнения показаний поверяемого прибора 16 с весом поршня с грузами (элементы 2, 3, 4). Поверку манометров можно также осуществлять методом непосредственного сличения показаний поверяемого прибора 16 и образцового прибора 17 при измерениях одних и тех же величин.. При этом грузовая часть грузопоршневого манометра в процессе не участвует (вентиль 13 закрыт).

Измерение внешнего давления с помощью грузопоршневого манометра производят следующим образом. Давление в системе доводят до атмосферного (штурвал 11 полностью выкручивают против часовой стрелки), вентили 12 и 13 открывают, 14 и 75закрывают. К штуцеру 6 с помощью импульсной трубки подводят измеряемое давление. Устанавливая на тарелку 3 необходимое количество контрольных грузов 4, добиваются равновесия поршня 2. При этом вес контрольных грузов с тарелкой является мерой измеряемого давления.

Измерительные преобразователи давления

Пьезоэлектрические преобразователи

Принцип действия пьезоэлектрических измерительных преобразователей давления основан на явлении пьезоэффекта, рассмотренном в гл 2. Измеряемое давление P преобразуется мембраной 1 в усилие, вызывающее сжатие кварцевых пластин 2 (рис. 5.5). С по-

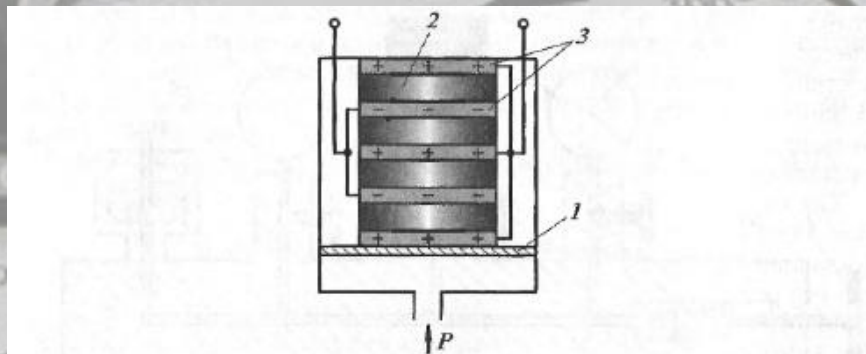


Рис. 5.5. Пьезодатчик давления:

1 — мембрана; 2 — кварцевые пластины; 3 — обкладки; P — измеряемое давление

мощью обкладок 3 снимается выходной сигнал в виде ЭДС. Выражение для измеряемого давления P имеет вид

$$P = \frac{E \varepsilon f}{k F d}, \quad (5.8)$$

где E — ЭДС на обкладках датчика; ε — диэлектрическая проницаемость материала пластин; f — площадь грани, перпендикулярной к оси деформации; k — пьезоэлектрическая постоянная материала пластин; F — эффективная площадь мембраны; d — толщина пластин.

Из-за утечки заряда с кварцевых пластин пьезодатчики давления не используются для измерения статических давлений. Одна из сфер их применения — преобразование быстропеременного и импульсного давления в электрический сигнал в вихревых расходомерах, рассматриваемых в гл. 6. Верхний предел измерений пьезоэлектрических измерительных преобразователей давления 100 МПа.

Тензорезисторные преобразователи

Принцип действия тензорезисторных измерительных преобразователей давления основан на явлении тензоэффекта. На сегодняшний день тензорезисторные измерительные преобразователи давления являются самыми популярными в мире. Они представляют собой металлическую и (или) диэлектрическую измерительную мембрану, на которой размещаются тензорезисторы. Деформация мембраны под воздействием внешнего давления приводит к локальным деформациям тензорезисторов, включенным обычно в плечи четырехплечего уравновешенного моста. При этом одна пара тензорезисторов, включенных в противоположные плечи моста, имеет положительную тензочувствительность, а другая — отрицательную. При отсутствии давления все четыре сопротивления равны по величине и мост сбалансирован. При подаче давления баланс (равновесие) моста нарушается, и в измерительной диагонали моста будет протекать ток. Этот токовый сигнал и является мерой измеряемого давления.

Тензорезисторы выполняются как из металлов (проволочные, фольговые), так и из полупроводников.

Поскольку чувствительность полупроводниковых тензорезисторов в десятки раз выше, чем у металлических, то в последние годы получили преимущественное развитие интегральные полупроводниковые тензорезисторные чувствительные элементы. Такие чувствительные элементы реализуются **двумя способами**:

- 1) по гетероэпитаксиальной технологии «кремний на сапфире» (КНС), в соответствии с которой тонкая пленка кремния выращивается на подложке из сапфира, припаянной твердым припоем к титановой мембране (рис. 5.6, а);
- 2) по технологии диффузионных резисторов с изоляцией их от проводящей кремниевой подложки р-и-переходами — технология «кремний на кремнии» (КНК).

В структуре КНК мембрана из монокристаллического кремния размещается на диэлектрическом основании с использованием легкоплавкого стекла или методом анодного срачивания (рис. 5.6, б).

Наибольшую погрешность в результат измерения давления с помощью тензорезисторных измерительных преобразователей вносит изменение температуры.

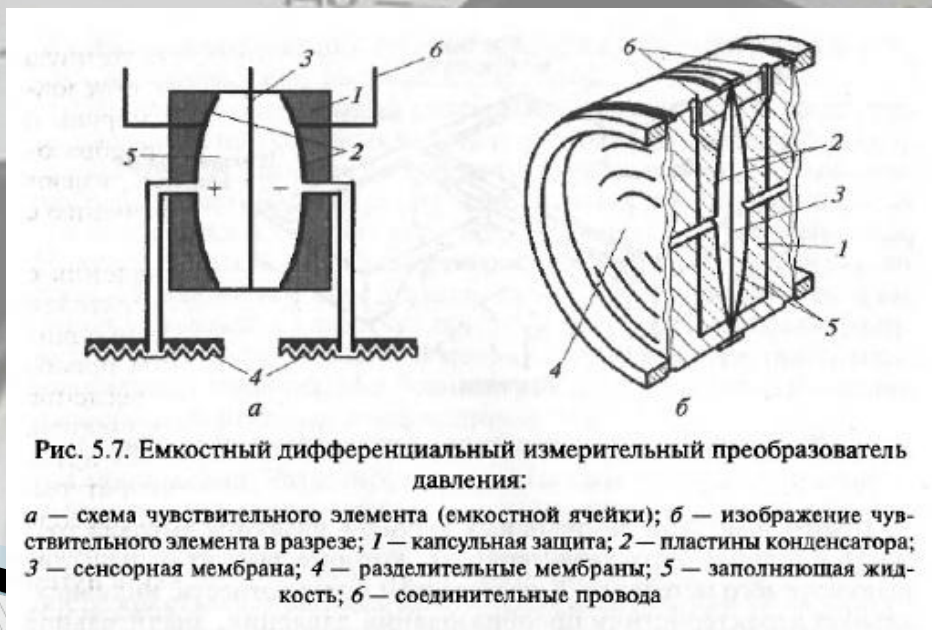


Емкостные преобразователи

В емкостном измерительном преобразователе давления измеряемое давление воспринимается металлической мембраной, являющейся подвижным электродом конденсатора. Неподвижный электрод изолируется от корпуса с помощью изолятора.

В емкостных дифференциальных измерительных преобразователях давления (рис. 5.7) **чувствительный элемент** состоит из двух соединенных конденсаторов. Воздействие давления вызывает изменение положения измерительной (сенсорной) мембраны центральной обкладки конденсатора, которое приводит к изменению обеих емкостей конденсаторов.

Емкостные преобразователи давления применяют для измерения быстро изменяющегося давления с верхним пределом до 120 МПа.



Резонансные преобразователи

Резонансный принцип используется в датчиках давления на основе вибрирующего цилиндра, струнных датчиках, кварцевых датчиках, резонансных датчиках на кремнии. В основе метода лежат волновые процессы: акустические или электромагнитные. Это и объясняет высокую стабильность датчиков и высокие выходные характеристики прибора.

Частным примером может служить **резонансный измерительный**

преобразователь давления с кремниевым механическим резонатором.. Кремниевый резонатор (рис. 5.8) представляет собой параллелепипед

плоской формы, защищенный герметичной капсулой и интегрированный в плоскость кремниевой мембраны. Резонатор возбуждается сигналом переменного тока и окружающего магнитного поля. Колебания механического резонатора в постоянном магнитном поле преобразуются в колебания электрического контура, и в итоге на выходе чувствительного элемента образуется цифровой (частотный) сигнал, пропорциональный величине измеряемого давления.



Рис. 5.8. Кремниевый резонансный чувствительный элемент

Кроме кремниевых резонансных чувствительных элементов существуют кварцевые резонансные чувствительные элементы.

Преимущества резонансных датчиков являются высокая точность и стабильность характеристик, которые зависят от качества используемого материала. **К недостаткам** можно отнести: индивидуальную характеристику преобразования давления, значительное время отклика, невозможность проведения измерений в агрессивных средах без потери точности показаний прибора.

Особенности эксплуатации и монтажа СИ давления

Существует несколько положений, которые должны выполняться независимо от характера производства.

Присоединение СИ давления к объекту измерения осуществляется одним из *трех способов*:

- 1) давление подводится к СИ давления по импульсным линиям (с внутренним диаметром 2... 15 мм и длиной до 50 м);
- 2) СИ давления вворачиваются в гнездо или специальный штуцер непосредственно в местах отбора давления;
- 3) СИ давления устанавливаются в отверстия и привариваются к объектам.

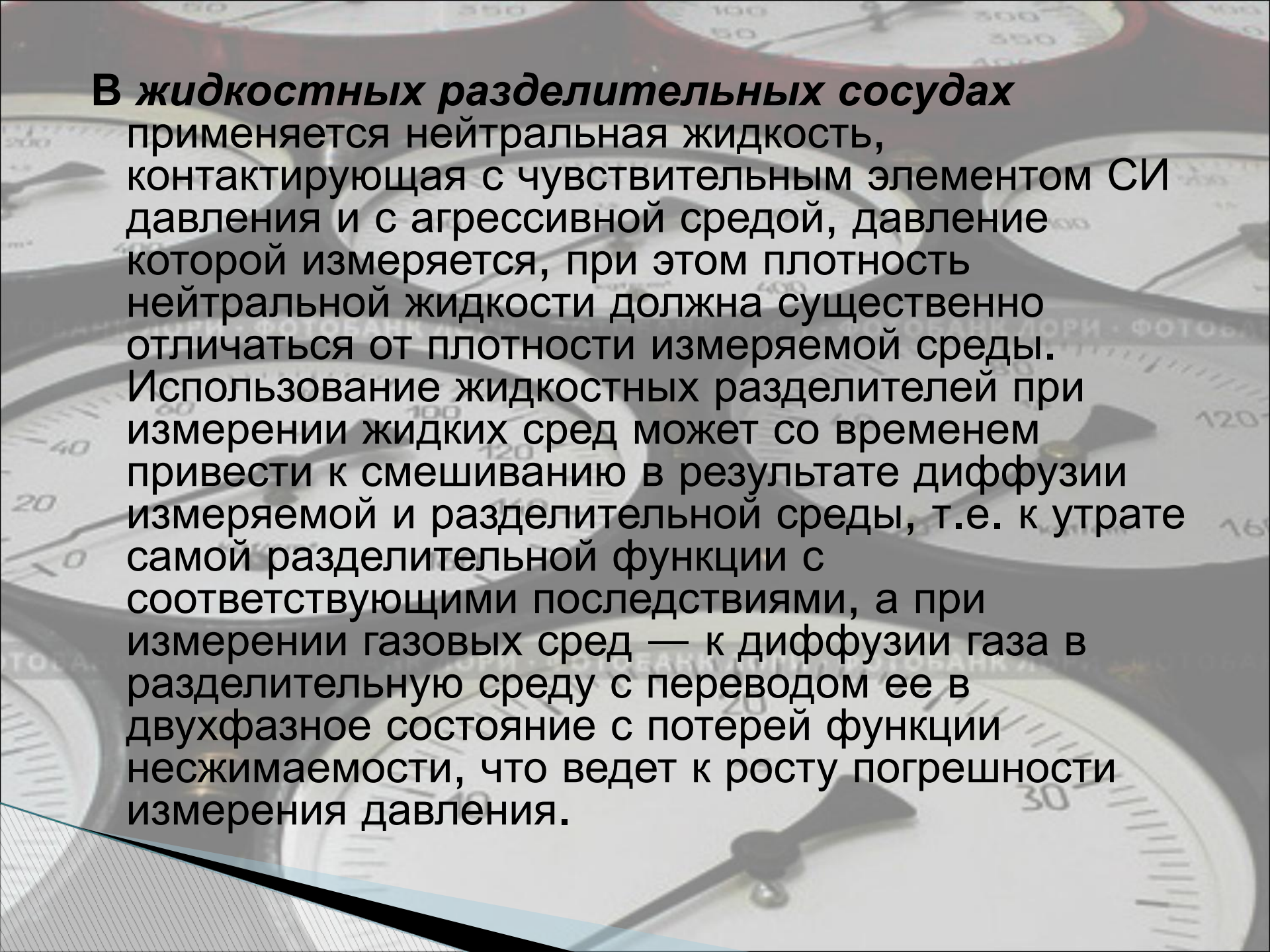
При монтаже СИ давления с помощью импульсных линий необходимо соблюдать следующие требования:

- место отбора давления в жидких средах не рекомендуется выбирать в нижних и верхних точках трубопроводов во избежание попадания шламов, взвесей и газов в импульсные линии, а в газовых средах — в нижних точках во избежание попадания влаги в импульсные линии
- необходимо, чтобы устройства отбора давления не вызывали возмущения течения среды, т. е. края отверстий в стенках трубопроводов не выступали в ее поток.

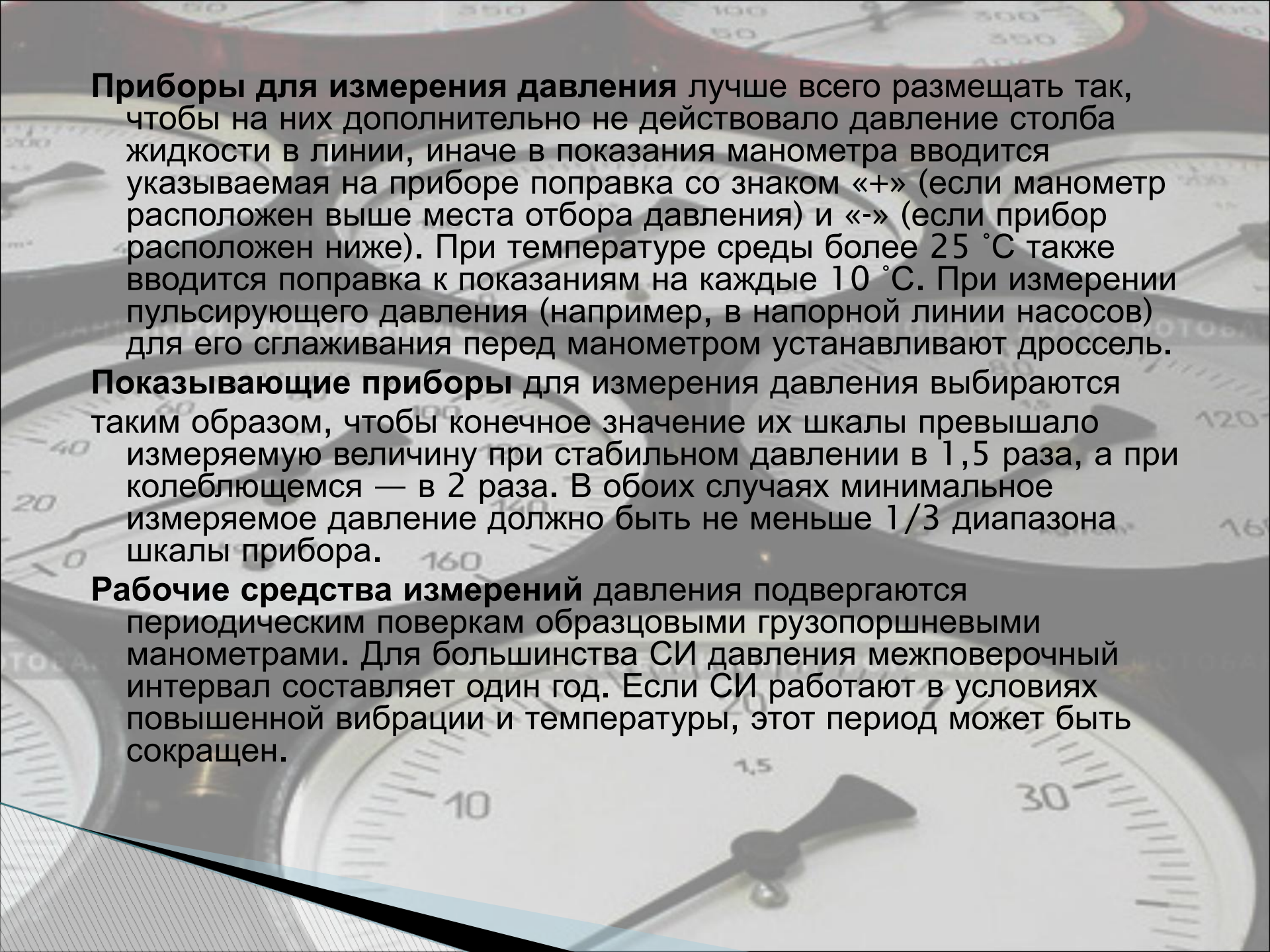
Мембранные разделители изготавливаются с *закрытой* и *открытой* мембранами.

Разделители с закрытой мембраной состоят из верхнего и нижнего фланцев, между которыми устанавливается мембрана.

В конструкции **разделителей с открытой мембраной** отсутствует нижний фланец. Открытая мембрана не дает возможности кристаллизующимся средам и твердым осадкам скапливаться в значительном количестве, затрудняющем или совершенно прекращающем передачу давления к чувствительному элементу. Кроме того, она доступна для периодической очистки. При монтаже разделителей с открытой мембраной присоединение этих разделителей к месту отбора давления осуществляется фланцами, закрепляемыми болтами



В жидкостных разделительных сосудах применяется нейтральная жидкость, контактирующая с чувствительным элементом СИ давления и с агрессивной средой, давление которой измеряется, при этом плотность нейтральной жидкости должна существенно отличаться от плотности измеряемой среды. Использование жидкостных разделителей при измерении жидких сред может со временем привести к смешиванию в результате диффузии измеряемой и разделительной среды, т.е. к утрате самой разделительной функции с соответствующими последствиями, а при измерении газовых сред — к диффузии газа в разделительную среду с переводом ее в двухфазное состояние с потерей функции несжимаемости, что ведет к росту погрешности измерения давления.



Приборы для измерения давления лучше всего размещать так, чтобы на них дополнительно не действовало давление столба жидкости в линии, иначе в показания манометра вводится указываемая на приборе поправка со знаком «+» (если манометр расположен выше места отбора давления) и «-» (если прибор расположен ниже). При температуре среды более 25 °С также вводится поправка к показаниям на каждые 10 °С. При измерении пульсирующего давления (например, в напорной линии насосов) для его сглаживания перед манометром устанавливают дроссель.

Показывающие приборы для измерения давления выбираются таким образом, чтобы конечное значение их шкалы превышало измеряемую величину при стабильном давлении в 1,5 раза, а при колеблющемся — в 2 раза. В обоих случаях минимальное измеряемое давление должно быть не меньше 1/3 диапазона шкалы прибора.

Рабочие средства измерений давления подвергаются периодическим поверкам образцовыми грузопоршневыми манометрами. Для большинства СИ давления межповерочный интервал составляет один год. Если СИ работают в условиях повышенной вибрации и температуры, этот период может быть сокращен.