

Омский Государственный Технический Университет
Кафедра «Радиотехнические устройства и системы
диагностики»

Голубятникова Наталия Олеговна

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

ТЕМА 4

ИЗМЕРЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ

Слайд – лекция

© ОмГТУ, 2022

ПЛАН ЛЕКЦИИ

Рекомендуемая литература

- 1 Основные определения
- 2 Классификация средств измерения давления
- 3 Жидкостные манометры
- 4 Деформационные манометры
- 5 Измерительные преобразователи давления
 - 5.1 Пьезоэлектрические преобразователи
 - 5.2 Тензорезистивные преобразователи
 - 5.3 Емкостные преобразователи
 - 5.4 Резонансные преобразователи
- 6 Интеллектуальные датчики

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 1 Основы автоматизации производственных процессов нефтегазового производства:** учеб. пособие. / Под ред. М. Ю. Праховой – М, Издательский центр «Академия», 2012 -256 с. (библиотека ОмГТУ)
- 2 Разработка методики расчета и проектирования упругого элемента тензодатчика на структуре “кремний на сапфире”:** **диссертация** на соискание ученой степени кандидата технических наук 01.02.06 – Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры. / **Скворцов Павел Аркадьевич** – М., 2019
- 3 ГОСТ Р 8.905-2015** Государственная система обеспечения единства измерений. МАНОМЕТРЫ ПОКАЗЫВАЮЩИЕ Рабочие средства измерений. Метрологические требования и методы испытаний
- 4 ГОСТ Р 8.906-2015** Государственная система обеспечения единства измерений. Манометры показывающие. Эталонные средства измерений. Метрологические требования и методы испытаний

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Давлением называется отношение силы, действующей перпендикулярно поверхности, к площади этой поверхности.

Различают следующие **виды давления**: атмосферное, абсолютное, избыточное и вакуумметрическое.

- **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, превышающее окружающее давление, которое принимают за опорное (ГОСТ Р 8.905-2015). Представляет собой разность между абсолютным и барометрическим давлениями.
- **Вакуумметрическое** (разрежение) (отрицательное избыточное) давление, не превышающее окружающее давление, которое принимают за опорное (ГОСТ Р 8.905-2015). Представляет разность между барометрическим и абсолютным давлением.

В Международной системе единиц (SI) за единицу давления принят **паскаль** (Па) — давление, создаваемое силой в 1 ньютон (Н), равномерно распределенной по поверхности площадью 1 м^2 и направленной нормально к ней.

Соотношения между различными единицами давления

Единица	Па	кПа	МПа	кгс/см ²	бар	физ. атм.	мм вод. ст.	мм рт. ст.	psi
1 Па	1	10 ⁻³	10 ⁻⁶	1,0197·10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	9,8692·10 ⁻⁶	0,101972	7,5006·10 ⁻³	1,45037·10 ⁻⁴
1 кПа	10 ³	1	10 ⁻³	1,0197·10 ⁻²	10 ⁻²	9,8692·10 ⁻³	101,972	7,5006	0,145037
1 МПа	10 ⁶	10 ³	1	10,1972	10	9,86923	101971,6	7500,62	145,0377
1 кгс/см ²	98066,5	98,0665	0,0980665	1	0,980665	0,967841	10 ⁴	735,56	14,22333
1 бар	10 ⁵	100	0,1	1,0197	1	0,986923	10197,2	750,06	14,50377
1 физ. атм.	1,01325·10 ⁵	1,01325·10 ²	0,101325	1,03323	1,01325	1	1,033·10 ⁴	760	14,69594
1 мм вод. ст.	9,80665	9,80665·10 ⁻³	9,80665·10 ⁻⁶	10 ⁻⁴	9,8067·10 ⁻⁵	9,6784·10 ⁻⁵	1	7,356·10 ⁻²	1,4223·10 ⁻³
1 мм рт. ст.	133,322	0,133322	1,33322·10 ⁻⁴	1,3595·10 ⁻³	1,3332·10 ⁻³	1,3158·10 ⁻³	13,5951	1	1,9337·10 ⁻³
1psi	6894,76	6,89476	6,89476·10 ⁻³	7,0307·10 ⁻²	6,89476·10 ⁻²	6,8046·10 ⁻²	703,07	51,7151	1

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

- тензорезисторные
- пьезоэлектрические
- емкостные
- резонансные
- и др.

ПРИБОРЫ

- манометры
- барометры
- вакуумметры
- мановакуумметры
- напоромеры и тягомеры
- дифференциальные манометры (дифманометры)

ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ

ВИДЫ ДАВЛЕНИЯ

- атмосферное
- абсолютное
- избыточное
- вакуум (разрежение)

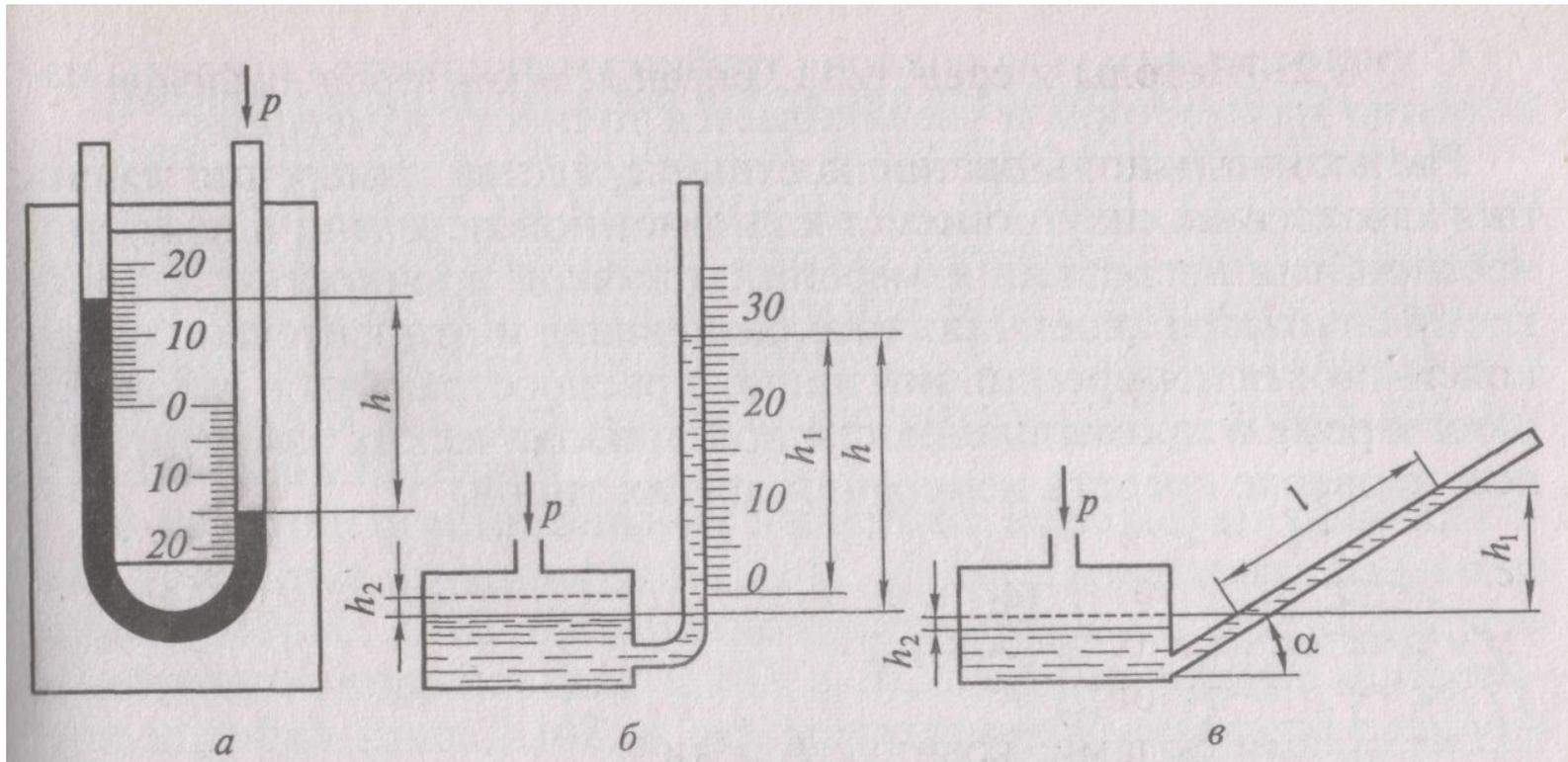
- паскаль (1 **Па** = 1 Н/м²) в СИ
- кгс/см² (техническая атмосфера, **ат**);
- физическая атмосфера, **атм**;
- **мм рт. ст.**;
- **мм вод. ст.**;
- **кгс/м²**;
- **бар**
- **psi** (lbf/in²)

ЖИДКОСТНЫЕ МАНОМЕТРЫ

Принцип действия Измеряемое давление уравнивается гидростатическим давлением столба рабочей жидкости.

ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ 0,1 МПа

В зависимости от конструкции сосуда с рабочей жидкостью



U-образные (двухтрубные) чашечные (однотрубные) с вертикальной трубкой

чашечные (однотрубные) с наклонной трубкой (микроманометры)

U-образный манометр представляет собой изогнутую в виде латинской буквы U стеклянную трубку, заполненную до половины рабочей жидкостью. Измеряемая величина уравнивается столбом рабочей жидкости, высота которого равна сумме высот столбов в обоих коленах трубки. 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. Из-за того что сечения трубок не всегда одинаковы, на практике приходится снимать показания двух высот. Этот недостаток устранен в чашечных манометрах.

В **чашечных (однотрубных)** манометрах одна из трубок заменена широким сосудом, сообщаемся 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.

При точных измерениях применяются чашечные манометры с наклонной трубкой, имеющие большую чувствительность (**микроманометры**). Показания манометра при измерениях определяются по длине столбика рабочей жидкости в трубке,

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ

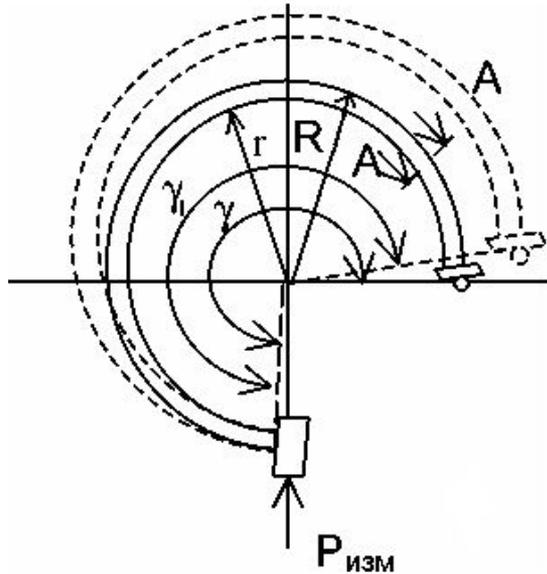
Принцип действия основан на упругой деформации чувствительных элементов под действием измеряемого давления

МАНОМЕТРЫ

ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Одно- и многovitковые трубчатые пружины Мембраны

Одновитковая трубчатая пружина (манометрическая пружина, трубка



$$R\gamma = R_1\gamma_1$$

$$r\gamma = r_1\gamma_1$$

$$(R - r)\gamma = (R_1 - r_1)\gamma_1$$

Из условия
неизменности
длины пружины

$$R - r = b$$

$$R_1 - r_1 = b_1$$

$$\gamma_1 = \gamma - \Delta\gamma$$

$$b_1 = b + \Delta b$$

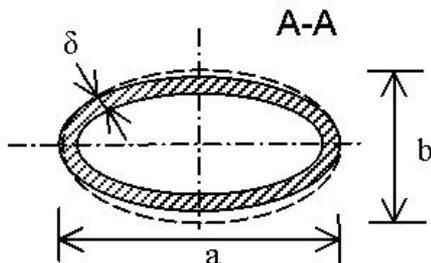
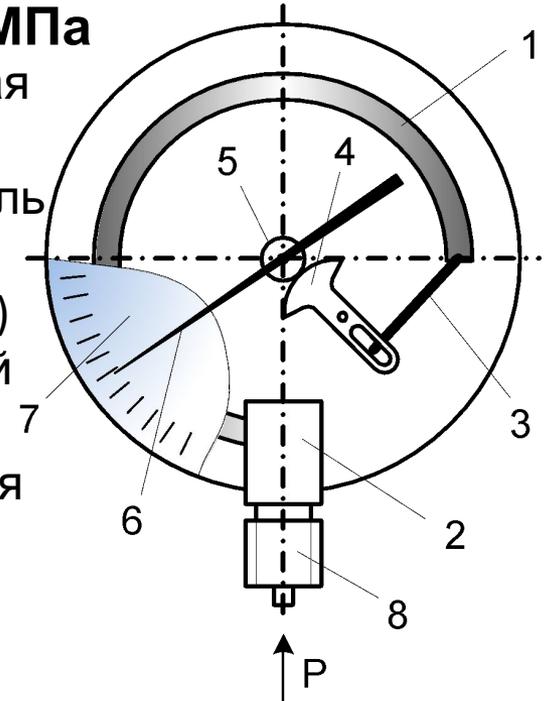
*Уравнение шкалы
манометра.*

*Кривизна трубки
уменьшается на
угол*

$$\Delta\gamma = \frac{\gamma b}{b + \Delta b}$$

**ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ
ИЗМЕРЕНИЯ 1000
МПа**

- 1** – трубчатая пружина
- 2** – держатель
- 3** – тяга (поводок)
- 4** – зубчатый сектор
- 5** – шестерня
- 6** – стрелка прибора
- 7** – шкала
- 8** – штуцер



Трубка Бурдона представляет собой упругую криволинейную металлическую полую трубку (латунь, бронза, легированные стали, сплавы никеля), один конец которой имеет возможность перемещаться, а другой жестко закреплен. Трубка в свободном состоянии в сечении имеет форму эллипса. 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 $P_{изм}$ трубка Бурдона деформируется в поперечном сечении. Продольные волокна элемента пружины растягиваются наиболее значительно у малой полуоси. В продольных волокнах наружного радиуса трубки Бурдона будет возникать растяжение, а в волокнах внутреннего радиуса — сжатие. Вследствие того что волокна стремятся сохранить свою первоначальную длину, трубка Бурдона будет разгибаться. При этом свободный конец трубки совершит некоторое линейное перемещение λ . Кривизна трубки уменьшится на угол $\Delta\gamma = \gamma - \gamma_1$, а малая ось эллипса увеличится на Δb .

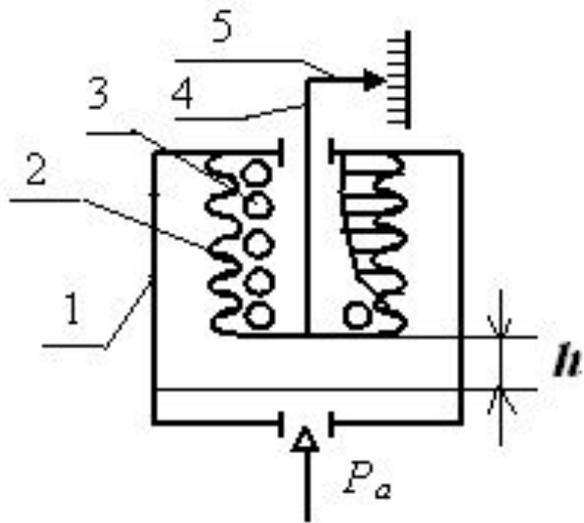
Принятые обозначения: R, r, R_1, r_1 – внешний и внутренний радиусы трубки до и после деформации соответственно.

Чувствительность трубчатого манометра тем больше, чем больше

СИЛЬФОН

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.

ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ 0,4 МПа



- 1 – измерительная камера
- 2 – сильфон
- 3 – пружина
- 4 – рычаг
- 5 – стрелка

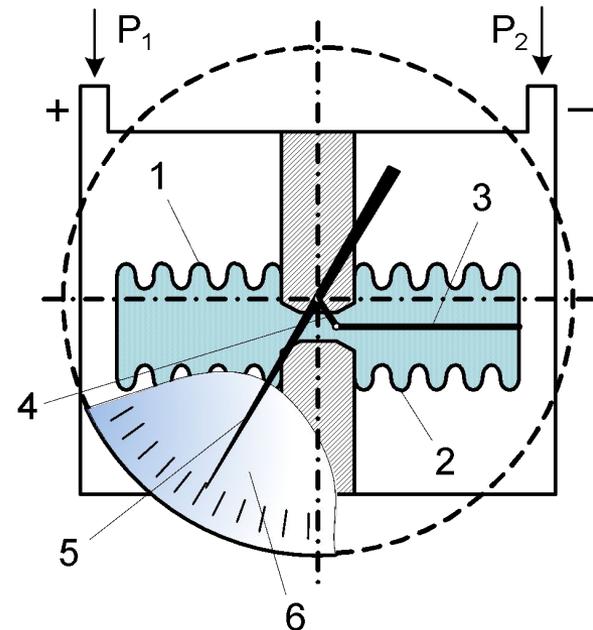
Жесткость сильфона

$$K_M = K_{\Pi} + K_C / n,$$

Противодействующее
усилие

$$F_{пр} = K_M * h,$$

$$F_{пр} = P_A * S_{эф}$$



- 1, 2 – сильфоны
- 3 – шток
- 4 – рычаг
- 5 – стрелка
- 6 – шкала

Принцип действия **сильфонного дифманометра**. 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**.

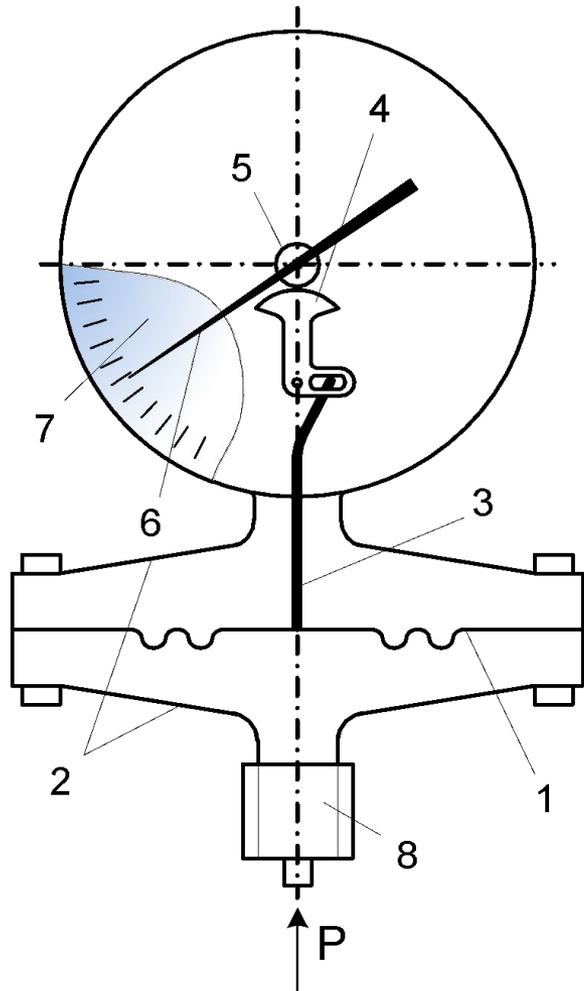
Для **увеличения жесткости** сильфонов внутри них могут быть установлены винтовые пружины.

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

Принятые обозначения: K_{Γ} — жесткость пружины; K_C — жесткость одного гофра; n — число гофр, h — величина сжатия.

МЕМБРАНА

ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ 2,5 МПа



- 1 – гофрированная мембрана
- 2 – фланцы
- 3 – шток
- 4 – зубчатый сектор
- 5 – шестерня
- 6 – стрелка
- 7 – шкала
- 8 – штуцер

ВИДЫ МЕМБРАН

- плоские
- гофрированные

- упругие
(сталь, бронза, латунь)
- эластичные (вялые)
(прорезиненная ткань, тефлон)
- эластичные с жестким центром

$$N = P \cdot F_{\text{эф}} = P \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{12},$$

$$N = P \cdot \frac{\pi \cdot (D^2 + d \cdot D + d^2)}{12},$$

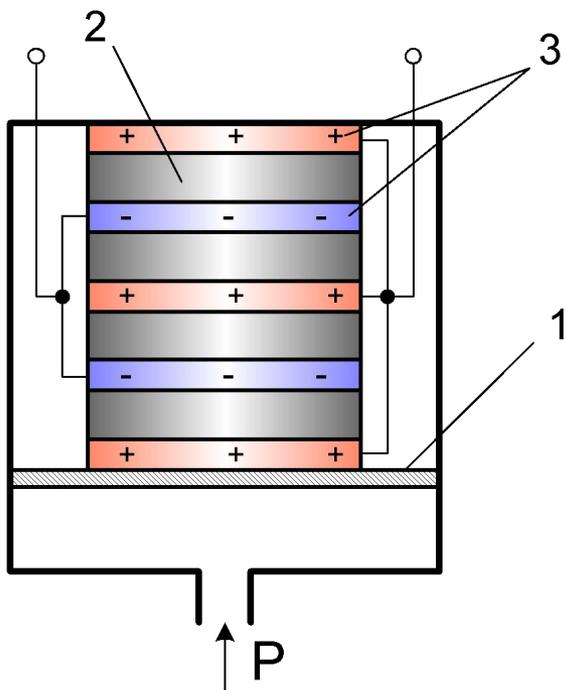
В мембранном манометре мембрана 1 зажимается или приваривается по краю между двумя фланцами 2. Давление, действующее на мембрану, вызывает ее прогиб, в результате которого изогнутый шток 3 совершает вертикальное перемещение. Перемещение штока передается зубчатому сектору 4 и шестерне 5, на оси которой 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. При необходимости получения большого прогиба мембраны соединяются в так называемые мембранные коробки, а также блоки, собранные из нескольких коробок. Манометры с мембранной коробкой особенно пригодны для измерений давления газообразных сред. При измерении атмосферного давления получили распространение гофрированные мембранные коробки, из внутренней полости которых удален воздух.

Достоинства деформационных манометров высокая точность, простота

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ДАВЛЕНИЯ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ

ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ 100 МПа

Принцип действия основан на прямом пьезоэлектрическом эффекте т.е. появлении электрических зарядов на гранях некоторых диэлектриков (кварц, турмалин) при деформации



- 1 – мембрана
- 2 – кварцевые пластины



- 3 – обкладки

$$P = \frac{E \epsilon \epsilon_0 f}{k_{\Pi} F d}$$



$$E = \frac{Q}{C_{\Pi}}$$

$$C_{\Pi} = \frac{\epsilon \epsilon_0 f}{d}$$

$$Q = K_{\Pi} * F = K_{\Pi} * P * f$$

Принятые обозначения: 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.

ТЕНЗОРЕЗИСТИВНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

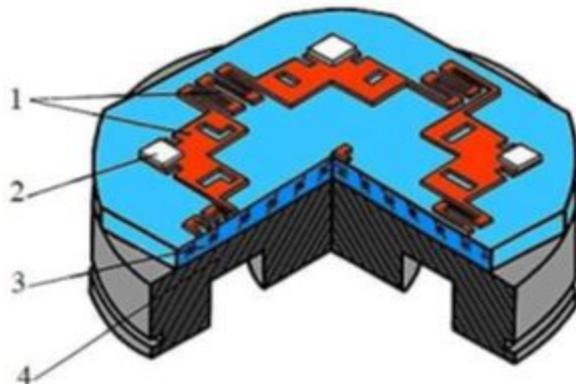
Принцип действия основан на явлении тензоэффекта, т.е. изменении активного электрического сопротивления проводниковых (константан, нихром, хромель) и полупроводниковых материалов (кремний) при деформации под действием механических усилий.

Чувствительность полупроводниковых тензорезисторов (кремний) в десятки раз выше, чем у металлических. С появлением технологии изготовления полупроводникового тензорезистора непосредственно на кристаллическом элементе, выполненном из диэлектрика, сделала их самыми популярными в мире преобразователями давления.

ТЕХНОЛОГИЯ КРЕМНИЙ НА ИЗОЛЯТОРЕ (КНИ) КРЕМНИЙ НА САПФИРЕ (КНС) и КРЕМНИЙ НА КРЕМНИИ (КНК)

Конструкция двухмембранного тензопреобразователя на КНС

- 1 – тензометрический мост Уинстона из монокристаллического кремния
- 2 – контактные площадки
- 3 – сапфировая мембрана



4 – мембрана из титанового сплава

Преимущества применения технологии **КНС** в датчиках давления

- высокая чувствительность
- радиационная стойкость
- широкий диапазон рабочих температур
- выдерживают высокий уровень вибраций
- справляются с ударными нагрузками

Недостатки временная нестабильность градуировочной характеристики и погрешность гистерезиса от P и T



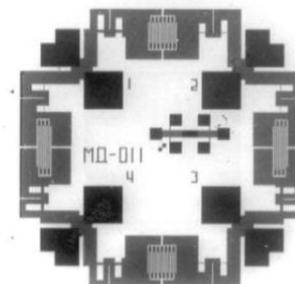
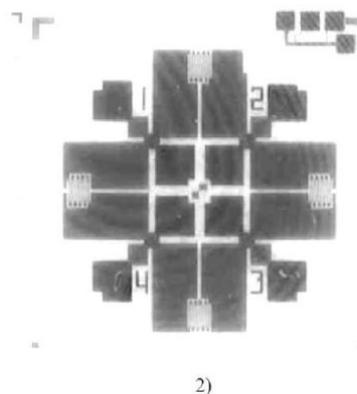
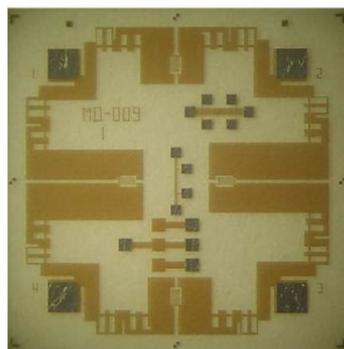
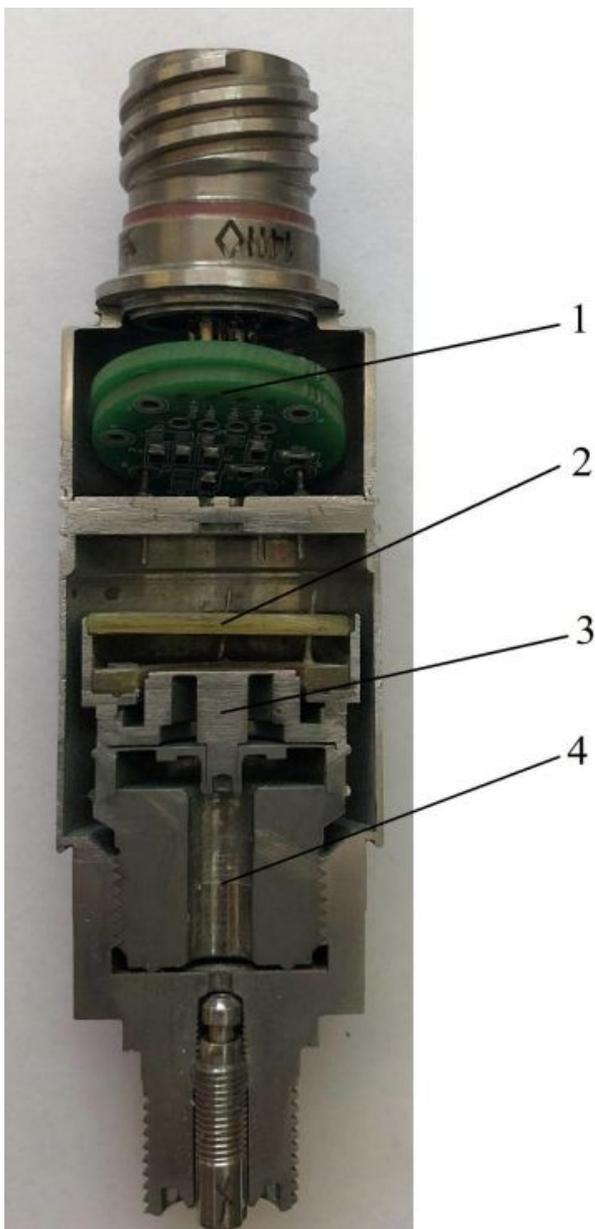
Производители:

- ПГ МИДА (г. Ульяновск)
- ЭПО Сигнал (г. Энгельс)
- ЗАО НПК ВИП (г. Екатеринбург)
- ЗАО Орлэкс (г. Орел)
- ОАО НИИФИ (г. Пенза)
- ПГ Метран (г. Челябинск)
- Honeywell (США)
- Sensonetics (США)
- Kulite Semiconductor Products (США)
- Yokogawa (Япония)
- Druck (Англия)

ДАТЧИК ДАВЛЕНИЯ НА КНС ЭПО «СИГНАЛ»

ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ 3 МПа

- 1** – блок электроники
- 2** – коллектор для снятия сигнала
- 3** – двухмембранный упругий элемент из титанового сплава ВТ-9
- 4** – область для подачи давления



Топология ЧЭ КНС

КРЕМНИЙ НА КРЕМНИИ

MEMS

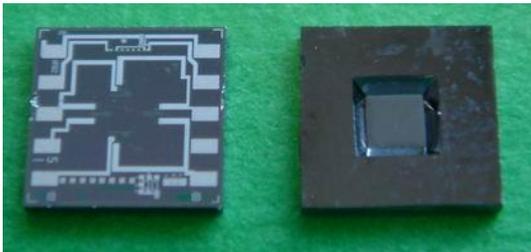
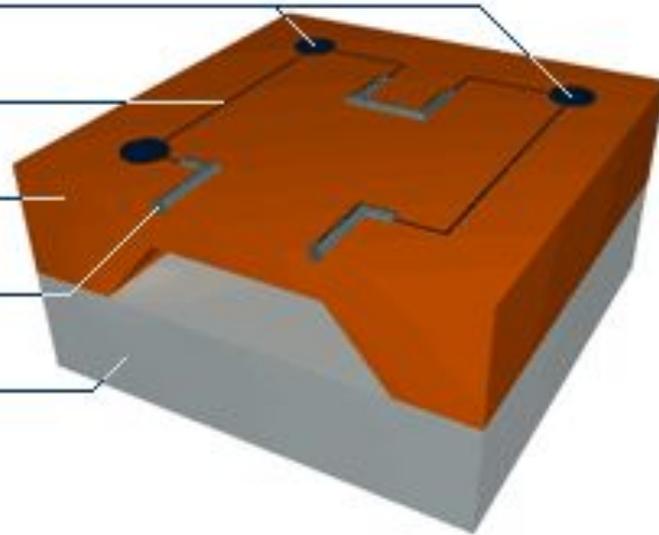
контактные площадки

металлизация

монокристаллический кремний

диффузионные резисторы

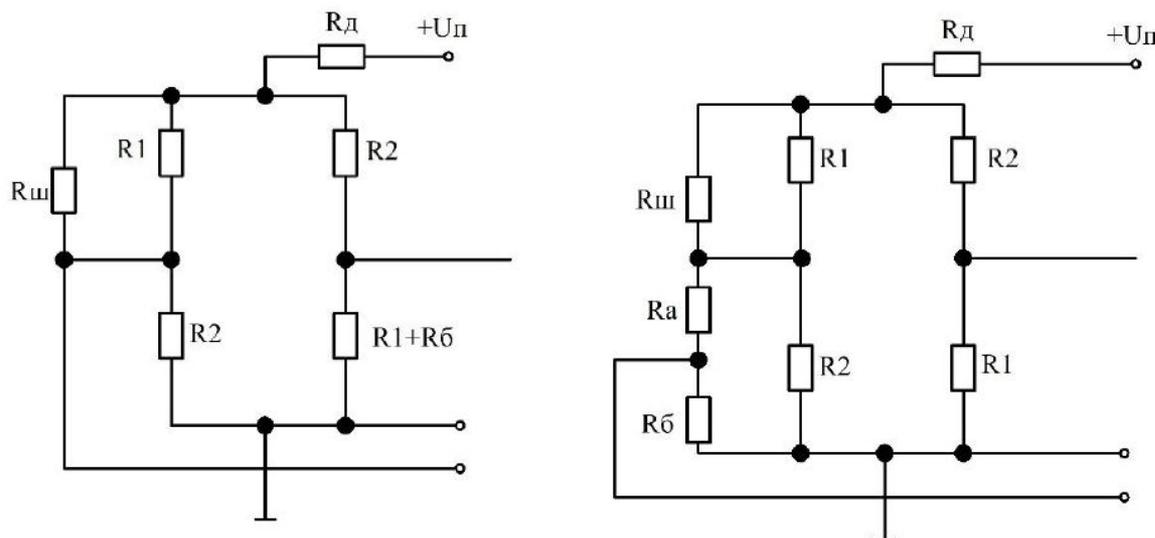
стеклянное основание



Имеют большую временную и температурную стабильность по сравнению с преобразователями на основе КНС – структур.

К недостаткам относятся низкий рабочий температурный диапазон (до 100 °С) и необходимость защищать чувствительный элемент металлической мембраной, что снижает чувствительность и увеличивает

Наибольшую погрешность в результат измерения давления с помощью тензорезистивных измерительных преобразователей вносит **изменение температуры**. Для ее уменьшения в связи с широким применением в последнее время интеллектуальных преобразователей, как правило, используется автоматическое введение поправок на температуру. При этом первичный преобразователь (тензорезистивный чувствительный элемент) подвергается предварительной градуировке при различных значениях температуры. Эти градуировочные данные вводятся в память микропроцессора интеллектуального преобразователя. При эксплуатации преобразователя измеряется температура и выходной ток датчика, и путем аппроксимации градуировочных данных



ЕМКОСТНЫЕ

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

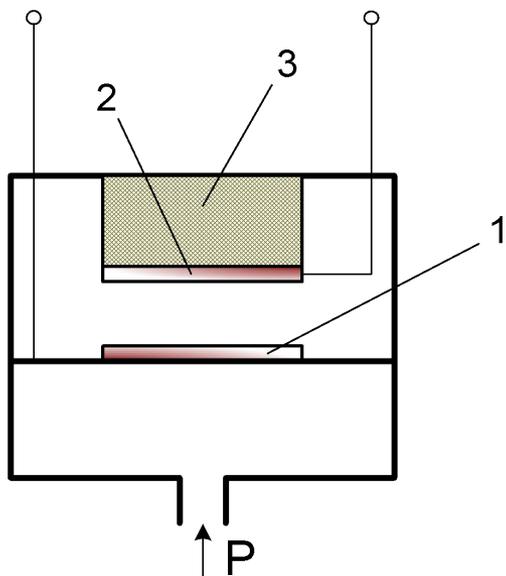
Принцип действия основан на изменении электрической емкости преобразователя из-за изменения расстояния между его обкладками под действием измеряемого давления

ВЕРХНИЙ ПРЕДЕЛ ИЗМЕРЕНИЯ 120 МПа

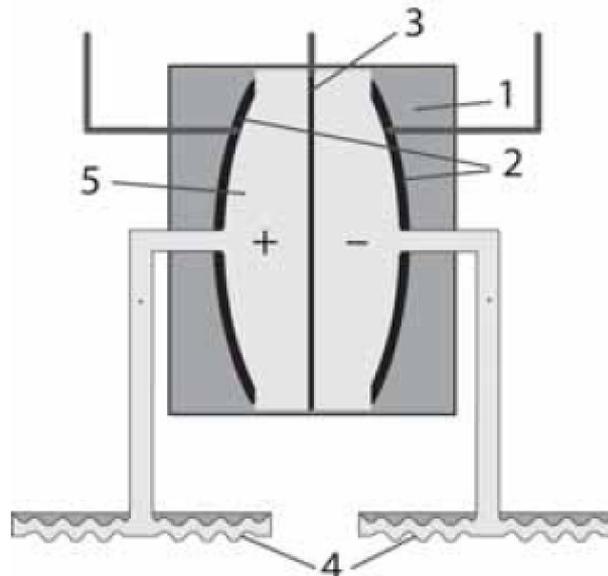
$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{\delta + \delta_0}$$

ϵ_0 — диэлектрическая постоянная
 ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей межэлектродный зазор
 S — площадь электродов
 δ_0 — расстояние между электродами при давлении, равном нулю

$$\delta = f(P)$$

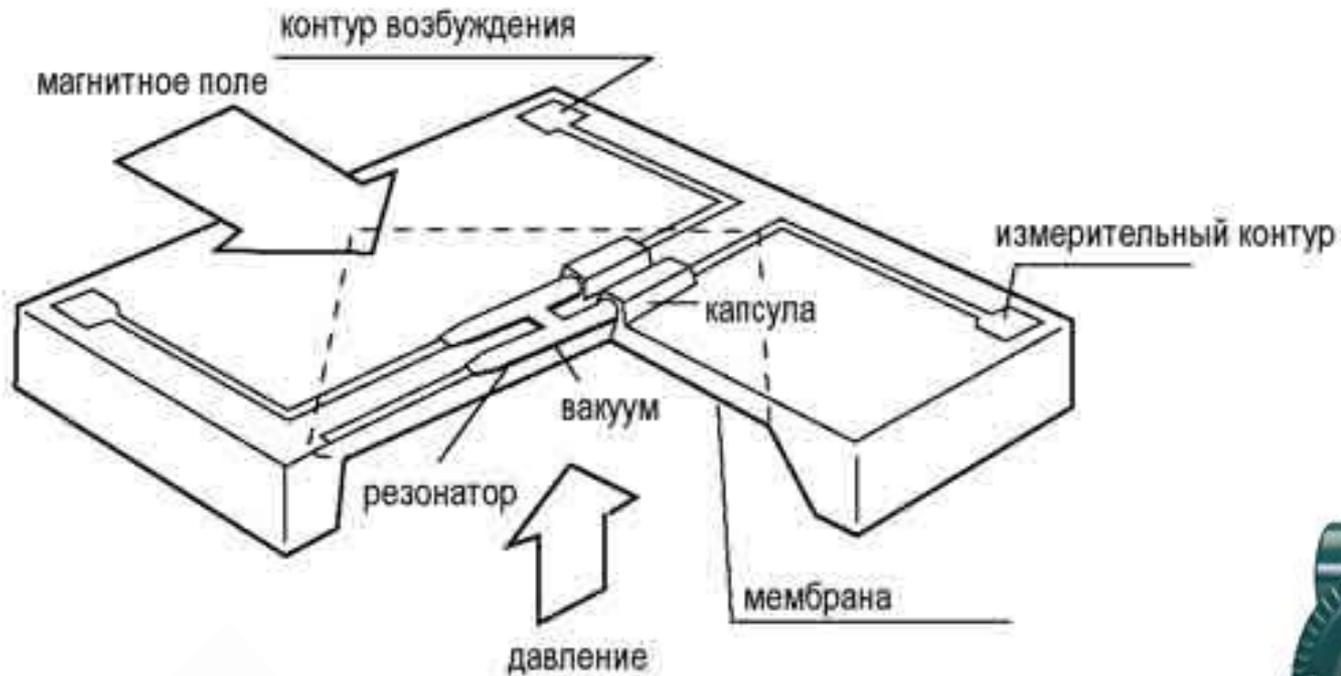


- 1** – мембрана (подвижный электрод конденсатора)
- 2** – неподвижный электрод конденсатора
- 3** – изолятор



- 1** – капсульная защита
- 2** – пластины конденсатора
- 3** – сенсорная мембрана
- 4** – разделительные мембраны
- 5** – заполняющая жидкость²²

РЕЗОНАНСНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ



Резонансный принцип используется в датчиках давления на основе вибрирующего цилиндра, струнных датчиках, кварцевых датчиках, резонансных датчиках на кремнии.

Частным примером может служить *резонансный измерительный преобразователь давления с кремниевым механическим резонатором* — разработка фирмы Yokogawa . Кремниевый резонатор представляет собой параллелепипед плоской формы, защищенный герметичной капсулой и интегрированный в плоскость кремниевой мембраны. Резонатор возбуждается сигналом переменного тока и окружающего магнитного поля. В зависимости от знака приложенного давления резонатор растягивается или сжимается, в результате чего частота его собственных механических колебаний растет или уменьшается соответственно. 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.

Преимуществами 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.

ТИПЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

- Датчики, имеющие аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) и интерфейс для связи с ПК типа *RS-232*, *RS-422*, *RS-485*. Устройства данного типа не имеют встроенного микроконтроллера и осуществляют только оцифровку аналогового сигнала с дальнейшей передачей на ПК
- Датчики, имеющие АЦП, микроконтроллер и интерфейс связи. Такие устройства осуществляют внутреннюю коррекцию получаемого аналогового сигнала; в них используются протоколы связи типа *HART*, *Modbus* и др. Настройка параметров этих датчиков осуществляется в основном локально (вручную с помощью коммутаторов различных типов)
- Датчики, имеющие АЦП, микроконтроллер (или специализированный микропроцессор) и двустороннюю связь с ПК, осуществляемую по интерфейсу *RS-485* посредством протоколов более высокого уровня: *Profibus*, *Fieldbus Foundation* и др. Они позволяют оператору непосредственно с пульта управления осуществлять настройку их параметров и режимов работы, проводить диагностику и калибровку

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ДАТЧИКА



КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие существуют виды давления?
2. В чем заключается принцип действия жидкостных манометров?
3. Какой из деформационных чувствительных элементов применяется для измерения больших значений давления: трубка Бурдона или сильфон? Почему?
4. В чем преимущество гофрированных мембран перед плоскими?
5. Какие вы знаете типы полупроводниковых тензорезистивных чувствительных элементов?
6. Для измерения каких давлений применяются пьезоэлектрические преобразователи?
7. В чем заключается принцип действия резонансных измерительных преобразователей давления?
8. Перечислите типы интеллектуальных датчиков.

КОНТАКТНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Разработчик:

старший преподаватель кафедры РТУ и СД

Голубятникова Наталия Олеговна

nogolubyatnikova@omgtu.ru