

## Измерения давления газов

Молекулы газов постоянно находятся в движении, распространяясь во всех направлениях. Силы сцепления между молекулами газа очень слабы, и поэтому газ может занять все свободное пространство. Так как молекулы газа находятся далеко друг от друга, газы легко сжимаются.

**Газы не имеют собственной формы. Растекаясь, они заполняют любой сосуд.**



Газы, в отличие от твердых тел и жидкостей, заполняют весь предоставленный им объем, например стальной баллон для хранения газом, камеру автомобильной шины или волейбольного мяча. При этом газ оказывает давление на стенки, дно и крышку баллона, камеры или любого другого тела в котором он находится. Давление газа обусловлено иными причинами, чем давление твердого тела на опору.



Известно, что молекулы газа беспорядочно движутся. При своем движении они сталкиваются друг с другом, а также со стенками сосуда, в котором находится газ. Молекул в газе много, поэтому число их ударов очень велико. Хотя сила удара отдельной молекулы мала, но действие всех молекул о стенки сосуда значительно, оно и создает давление газа.

**Итак, давление газа вызывается ударами молекул на стенки сосуда.**

**Зависимость давления газа от объема и температуры.**

Установлено, что давление газа по всем направлениям одинаково.

Иначе говоря, число ударов молекул, приходящихся на каждый квадратный сантиметр площади поверхности, по всем направлениям одинаково. Одинаковое давление по всем направлениям характерно для газа и является следствием беспорядочного движения огромного числа молекул.



Если объем газа уменьшить, но так, чтобы масса его осталась неизменной, то в каждом кубическом сантиметре газа молекул станет больше, плотность газа увеличится. Тогда число ударов молекул о стенки сосуда возрастет, т.е. возрастет давление газа.



При увеличении объема этой же массы газа число молекул в каждом кубическом сантиметре уменьшится, от этого уменьшится число ударов о стенки сосуда, следовательно, давление газа уменьшится.

Таким образом, при уменьшении объема газа его давление увеличивается, а при увеличении объема газа давление уменьшается при условии, что масса и температура газа остаются неизменными.

Давление газа при постоянном объеме изменяется и при изменении температуры. Известно, что скорость движения молекул при увеличении температуры увеличивается. Двигаясь быстрее, молекулы будут ударять о стенки сосуда чаще. Кроме того, каждый удар молекулы становится сильнее. В следствие этого, стенки сосуда будут испытывать большее давление.

Таким образом, из выше сказанного, можно сделать общий вывод, что давление газа тем больше, чем чаще и сильнее молекулы ударяют о стенки сосуда.

**Манометр** (от греческого слова *manos* - редкий, неплотный, разреженный) - прибор, измеряющий давление жидкости или газа.

### Принцип работы

Принцип действия манометра основан на уравнивании измеряемого давления силой упругой деформации трубчатой пружины или более чувствительной двухпластинчатой мембраны, один конец которой запаян в держатель, а другой через тягу связан с трибно-секторным механизмом, преобразующим линейное перемещение упругого чувствительного элемента в круговое движение показывающей стрелки.

### Разновидности

В группу приборов измеряющих избыточное давление входят:

Манометры — приборы с измерением от 0,06 до 1000 МПа (Измеряют избыточное давление — положительную разность между абсолютным и барометрическим давлением)

Вакуумметры — приборы измеряющие разрежения (давления ниже атмосферного) (до минус 100 кПа).

Мановакуумметры — манометры измеряющие как избыточное (от 60 до 240000 кПа), так и вакуумметрическое (до минус 100 кПа) давление.

Напоромеры -манометры малых избыточных давлений до 40 КПа

Тягомеры -вакуумметры с пределом до минус 40 КПа

Тягонапоромеры -мановакуумметры с крайними пределами не превышающими  $\pm 20$  кПа

Данные приведены согласно ГОСТ 2405-88

Большинство манометров изготавливаются в соответствии с общепринятыми стандартами, в связи с этим манометры различных марок заменяют друг друга. При выборе манометра нужно знать: предел измерения, диаметр корпуса, класс точности прибора. Также важны расположение и резьба штуцера. Эти данные одинаковы для всех выпускаемых в нашей стране и Европе приборов.

Также существуют манометры измеряющие абсолютное давление, то есть избыточное давление+атмосферное

Прибор, измеряющий атмосферное давление, называется барометром.

### **Типы манометров**

В зависимости от конструкции, чувствительности элемента различают манометры жидкостные, грузопоршневые, деформационные (с трубчатой пружиной или мембраной). Манометры подразделяются по классам точности: 0,15; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0 (чем меньше число, тем точнее прибор).

### **Манометр низкого давления**

#### **Виды манометров**

По назначениям манометры можно разделить на технические - общетехнические, электроконтактные, специальные, самопишущие, железнодорожные, виброустойчивые (глицеринозаполненные), судовые и эталонные (образцовые).

Общетехнические: предназначены для измерения не агрессивных к сплавам меди жидкостей, газов и паров.

Электроконтактные: имеют возможность регулировки измеряемой среды, благодаря наличию электроконтактного механизма.

Специальные: кислородные- должны быть обезжирены, так как иногда даже незначительное загрязнение механизма при контакте с чистым кислородом может привести к взрыву. Часто выпускаются в корпусах

голубого цвета с обозначением на циферблате O<sub>2</sub>(кислород); ацетиленовые - не допускают в изготовлении измерительного механизма сплавов меди, так как при контакте с ацетиленом существует опасность образования взрывоопасной ацетиленистой меди; аммиачные - должны быть коррозиестойкими.

Эталонные: обладая более высоким классом точности (0,15;0,25;0,4) эти приборы служат для поверки других манометров. Устанавливаются такие приборы в большинстве случаев на грузопоршневых манометрах или каких-либо других установках способных развивать нужное давление.

Судовые манометры предназначены для эксплуатации на речном и морском флоте.

Железнодорожные: предназначены для эксплуатации на Ж/Д транспорте.

Самопишущие: манометры в корпусе, с механизмом позволяющим воспроизводить на диаграммной бумаге график работы манометра.

#### Термопроводность

Термопроводные манометры основываются на уменьшении теплопроводности газа с давлением. В таких манометрах встроена нить накала, которая нагревается при пропускании через нее тока. Термопара или датчик определения температуры через сопротивление (ДОТС) могут быть использованы для измерения температуры нити накала. Эта температура зависит от скорости с которой нить накала отдаёт тепло окружающему газу и, таким образом, от термопроводности. Часто используется манометр Пирани, в котором используется единственная нить накала из платины одновременно как нагревательный элемент и как ДОТС. Эти манометры дают аккуратные показания в интервале между  $10$  и  $10^{-3}$  мм рт. ст., но они довольно чувствительны к химическому составу измеряемых газов.

#### Две нити накаливания

Одна проволочная катушка используется в качестве нагревателя, другая же используется для измерения температуры через конвекцию.

#### **Манометр Пирани (одна нить)**

Манометр Пирани состоит из металлической проволоки, открытой к измеряемому давлению. Проволока нагревается протекающим через нее током и охлаждается окружающим газом. При уменьшении давления газа, охлаждающий эффект тоже уменьшается и равновесная температура проволоки увеличивается. Сопротивление проволоки является функцией температуры: измеряя напряжение через проволоку и текущий через неё ток, сопротивление (и таким образом давление газа) может быть определено. Этот тип манометра был впервые сконструирован Марчелло Пирани.

Термопарный и термисторный манометры работают похожим образом. Отличие же в том, что термопара и термистор используются для измерения температуры нити накаливания.

Измерительный диапазон:  $10^{-3}$  — 10 мм рт. ст. (грубо  $10^{-1}$  — 1000 Па)

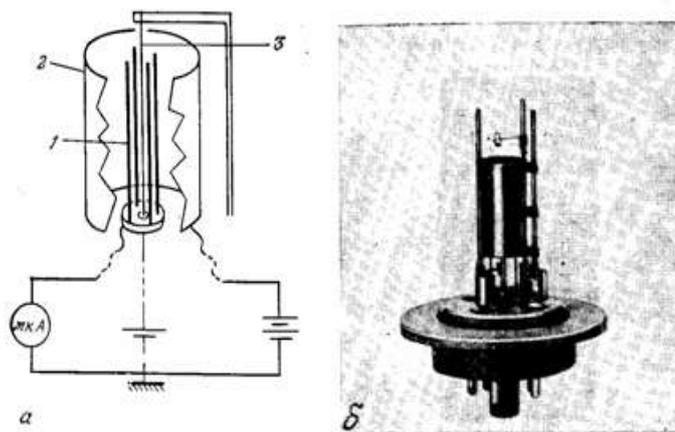
#### Ионизационный манометр

Ионизационные манометры — наиболее чувствительные измерительные приборы для очень низких давлений. Они измеряют давление косвенно через измерение ионов образующихся при бомбардировке газа электронами. Чем меньше плотность газа, тем меньше ионов будет образовано. Калибрование ионного манометра — нестабильно и зависит от природы измеряемых газов, которая не всегда известна. Они могут быть откалиброваны через сравнение с показаниями манометра Мак Леода, которые значительно более стабильны и независимы от химии.

Термоэлектроны соударяются с атомами газа и генерируют ионы. Ионы притягиваются к электроду под подходящим напряжением, известным как коллектор. Ток в коллекторе пропорционален скорости ионизации, которая является функцией давления в системе. Таким образом, измерение тока коллектора позволяет определить давление газа. Имеется несколько подтипов ионизационных манометров.

Измерительный диапазон:  $10^{-10}$  —  $10^{-3}$  мм рт. ст. (грубо  $10^{-8}$  —  $10^{-1}$  Па)

Большинство ионных манометров делятся на два вида: горячий катод и холодный катод. Третий вид - это манометр с вращающимся ротором более чувствителен и дорог, чем первые два и здесь не обсуждается. В случае горячего катода электрически нагреваемая нить накала создаёт электронный луч. Электроны проходят через манометр и ионизуют молекулы газа вокруг себя. Образующиеся ионы собираются на отрицательно заряженном электроде. Ток зависит от числа ионов, которое, в свою очередь, зависит от давления газа. Манометры с горячим катодом аккуратно измеряют давление в диапазоне  $10^{-3}$  мм рт. ст. до  $10^{-10}$  мм рт. ст. Принцип манометра с холодным катодом тот же, исключая, что электроны образуются в разряде созданным высоковольтным электрическим разрядом. Манометры с холодным катодом аккуратно измеряют давление в диапазоне  $10^{-2}$  мм рт. ст. до  $10^{-9}$  мм рт. ст. Калибрование ионизационных манометров очень чувствительно к конструкционной геометрии, химическому составу измеряемых газов, коррозии и поверхностным напылениям. Их калибровка может стать непригодной при включении при атмосферном и очень низком давлении. Состав вакуума при низких давлениях обычно непредсказуем, поэтому масс-спектрометр должен быть использован одновременно с ионизационным манометром для точных измерений.



## Горячий катод

Рис.4.11. Ионизационный датчик с горячим катодом (нормальный триод) (материалы фирмы Balzers).

а — принципиальная схема; б — пример исполнения.

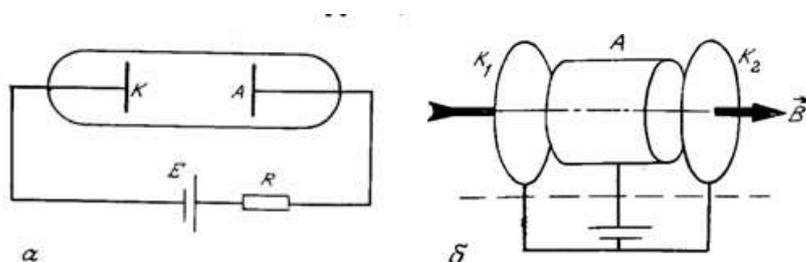
1 — коллектор ионов; 2 — анод; 3 — нить (катод).

Ионизационный манометр с горячим катодом Баярда-Алперта обычно состоит из трёх электродов работающих в режиме триода, где катодом является нить накала. Три электрода — это коллектор, нить накала и сетка. Ток коллектора измеряется в пикоамперах электрометром. Разность потенциалов между нитью накала и землёй обычно составляет 30 В, в то время как напряжение сетки под постоянным напряжением — 180—210 вольт, если нет опционоальной электронной бомбардировки, через нагрев сетки, которая может иметь высокий потенциал приблизительно 565 Вольт. Наиболее распространенный ионный манометр — это горячим катодом Баярда-Алперта с маленьким ионным коллектором внутри сетки. Стекланный кожух с отверстием к вакууму может окружать электроды, но обычно он не используется и манометр встраивается в вакуумный прибор напрямую и контакты выводятся через керамическую плату в стене ваккумного устройства. Ионизационные манометры с горячим катодом могут быть повреждены или потерять калибровку если они включаются при атмосферном давлении или даже при низком вакууме. Измерения ионизационных манометров с горячим катодом всегда логарифмичны.

Электроны испущенные нитью накала движутся несколько раз в прямом и обратном направлении вокруг сетки пока не попадут на неё. При этих движениях, часть электронов сталкивается с молекулами газа и формирует электрон-ионные пары (электронная ионизация). Число таких ионов пропорционально плотности молекул газа умноженной на термоэлектронный ток, и эти ионы летят на коллектор, формируя ионный ток. Так как плотность молекул газа пропорциональна давлению, давление оценивается через измерение ионного тока.

Чувствительность к низкому давлению манометров с горячим катодом ограничена фотоэлектрическим эффектом. Электроны, ударяющие в сетку, производят рентгеновские лучи, которые производят фотоэлектрический шум в ионном коллекторе. Это ограничивает диапазон старых манометров с горячим катодом до 10–8 мм рт. ст. и Баярда-Алперта приблизительно к 10–10 мм рт. ст. Дополнительные провода под потенциалом катода в луче обзора между ионным коллектором и сеткой предотвращают этот эффект. В типе извлечения ионы притягиваются не проводом, а открытым конусом. Поскольку ионы не могут решить, какую часть конуса ударить, они проходят через отверстие и формируют ионный луч. Этот луч иона может быть передан на кружку Фарадея.

### Холодный катод



Ионизационный вакуумметр с холодным катодом:

а – разрядная трубка; б – датчик Пеннинга.

На рис.4.8,б показана принципиальная схема симметричного манометра Пеннинга; между двумя катодами К1 и К2, имеющими форму плоских дисков, установленных один напротив другого, помещается цилиндрический анод А, окружающий область разряда. Направление магнитной индукции В совмещается с продольной осью системы. Электрический сигнал в форме тока  $i$ , циркулирующего в поляризационной цепи между анодом и катодом, представляет собой сумму тока электронов, захватываемых анодом, и тока ионов, захватываемых катодом. Соотношение между током  $i$  и давлением  $p$  довольно сложное и зависит от конструкции датчика и природы газа. Однако чувствительность  $S = \Delta i / \Delta p$  манометра остается сравнительно постоянной в диапазоне давлений, охватывающем два или три порядка, и равна примерно  $5 \cdot 10^{-2} \text{ А/Па}$ . Постоянная времени запаздывания составляет около 0,5с для работающего датчика (возобновление разряда).

Существует два вида манометров с холодным катодом: манометр Пеннинга (введённый Максом Пеннингом), и инвертированный магнетрон. Главное различие между ними состоит в положении анода относительно катода. Ни у одного из них нет нити накаливания, и каждому из них требуется

напряжение до 0,4 кВ для функционирования. Инвертированные магнетроны могут измерять давления до 10–12 мм рт. ст.

Такие манометры не могут работать если ионы, генерируемые катодом рекомбинируют прежде, чем они достигнут анод. Если средняя длина свободного пробега газа меньше, чем размеры манометра, тогда ток на электроде исчезнет. Практическая верхняя граница измеряемого давления манометра Пеннинга 10–3 мм рт. ст.

Точно так же манометры с холодным катодом могут не включиться при очень низких давлениях, так как почти полное отсутствие газа мешает устанавливать электродный ток — особенно в манометре Пеннинга, который использует вспомогательное симметричное магнитное поле, чтобы создать траектории ионов порядка метров. В окружающем воздухе подходящие ионные пары формируются посредством воздействия космической радиации; в манометре Пеннинга приняты меры, чтобы облегчить установку пути разряда. Например, электрод в манометре Пеннинга обычно точно сужается, для облегчения полевой эмиссии электронов.

Циклы обслуживания манометров с холодным катодом вообще измеряются годами, в зависимости от газового типа и давления, в котором они работают. Используя манометр с холодным катодом в газах с существенными органическими компонентами, такими как остатки масла насоса, может привести к росту тонких углеродистых плёнок в пределах манометра, которые в конечном счете замыкают электроды манометра, или препятствуют гереации пути разряда.

### **Применение манометров**

Манометры применяются во всех случаях, когда необходимо знать, контролировать и регулировать давление. наиболее часто манометры применяют в теплоэнергетике, на химических, нефтехимических предприятиях, предприятиях пищевой отрасли.

### **ДАТЧИКИ ДАВЛЕНИЯ**

Измерение давления необходимо для управления технологическими процессами и обеспечения безопасности производства. Кроме того, этот параметр используется при косвенных измерениях других технологических параметров: уровня, расхода, температуры, плотности и т.д. В системе СИ за единицу давления принят паскаль (Па).

В большинстве случаев первичные преобразователи давления имеют неэлектрический выходной сигнал в виде силы или перемещения и объединены в один блок с измерительным прибором. Если результаты измерений необходимо передавать на расстояние, то применяют промежуточное преобразование этого неэлектрического сигнала в

унифицированный электрический. При этом первичный и промежуточный преобразователи объединяют в один измерительный преобразователь.

### Методы преобразования давления

Датчик давления состоит (рис.1) из первичного преобразователя давления, в составе которого чувствительный элемент и приемник давления, схемы вторичной обработки сигнала, различных по конструкции корпусных деталей и устройства вывода. Основным отличием одних приборов от других является точность регистрации давления, которая зависит от принципа преобразования давления в электрический сигнал: тензометрический, пьезорезистивный, емкостной, индуктивный, резонансный, ионизационный.



Рис. 1 Блок-схема преобразователя давления в электрический сигнал

- 1- Чувствительный элемент
- 2- Приемник давления
- 3- Преобразователь давления
- 4- Измерительный преобразователь давления

### Тензометрический метод

В настоящее время основная масса датчиков давления в нашей стране выпускаются на основе чувствительных элементов (рис.2), принципом которых является измерение деформации тензорезисторов, сформированных в эпитаксиальной пленке кремния на подложке из сапфира (КНС), припаянной твердым припоем к титановой мембране. Иногда вместо кремниевых тензорезисторов используют металлические: медные, никелевые, железные и др.

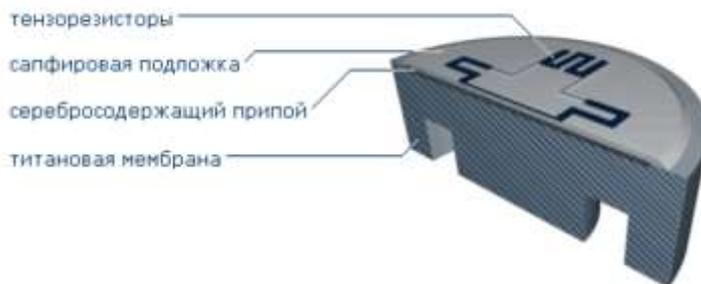


Рис.2 Упрощенный вид тензорезистивного чувствительного элемента

Принцип действия тензопреобразователей основан на явлении тензоэффекта в материалах. Чувствительным элементом служит мембрана с тензорезисторами, соединенными в мостовую схему. Под действием давления измеряемой среды мембрана прогибается, тензорезисторы меняют свое сопротивление, что приводит к разбалансу моста Уитстона. Разбаланс линейно зависит от степени деформации резисторов и, следовательно, от приложенного давления. Следует отметить принципиальное ограничение КНС преобразователя – неустранимую временную нестабильность градуировочной характеристики и существенные гистерезисные эффекты от давления и температуры. Это обусловлено неоднородностью конструкции и жесткой связью мембраны с конструктивными элементами датчика. Поэтому, выбирая преобразователь на основе КНС, необходимо обратить внимание на величину основной погрешности с учетом гистерезиса и величину дополнительной погрешности.

К преимуществам можно отнести хорошую защищенность чувствительного элемента от воздействия любой агрессивной среды, налаженное серийное производство, низкую стоимость.

### Пьезорезистивный метод

Практически все производители датчиков в России проявляют живой интерес к использованию интегральных чувствительных элементов на основе монокристаллического кремния. Это обусловлено тем, что кремниевые преобразователи имеют на порядок большую временную и температурную стабильности по сравнению с приборами на основе КНС структур. Кремниевый интегральный преобразователь давления (ИПД, рис.3) представляет собой мембрану из монокристаллического кремния с диффузионными пьезорезисторами, подключенными в мост Уинстона. Чувствительным элементом служит кристалл ИПД, установленный на диэлектрическое основание с использованием легкоплавкого стекла или методом анодного сращивания.



Рис.3 Кремниевый интегральный преобразователь давления

Для измерения давления чистых неагрессивных сред применяются, так называемые, Low cost – решения (рис.4), основанные на использовании чувствительных элементов либо без защиты, либо с защитой силиконовым гелем. Для измерения агрессивных сред и большинства промышленных применений применяется преобразователь давления в герметичном металлостеклянном корпусе, с разделительной диафрагмой из нержавеющей стали, передающей давление измеряемой среды на ИПД посредством кремнийорганической жидкости (рис.5).

Основным преимуществом пьезорезистивных датчиков является более высокая стабильность характеристик, по сравнению с КНС преобразователями. ИПД на основе монокристаллического кремния устойчивы к воздействию ударных и знакопеременных нагрузок. Если не происходит механического разрушения чувствительного элемента, то после снятия нагрузки он возвращается к первоначальному состоянию, что объясняется использованием идеально-упругого материала.

#### **Емкостной метод**

Емкостные преобразователи используют метод изменения емкости конденсатора при изменении расстояния между обкладками. Известны керамические или кремниевые емкостные первичные преобразователи давления и преобразователи, выполненные с использованием упругой металлической мембраны. При изменении давления мембрана с электродом деформируется и происходит изменение емкости. В элементе из керамики или кремния, пространство между обкладками обычно заполнено маслом или другой органической жидкостью (рис.6).

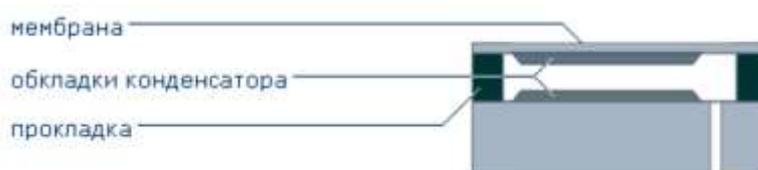


Рис.6 Емкостной керамический преобразователь давления, выполненный методами микромеханики

Достоинством чувствительного емкостного элемента является простота конструкции, высокая точность и временная стабильность, возможность измерять низкие давления и слабый вакуум.

К недостатку можно отнести нелинейную зависимость емкости от приложенного давления.

#### **Резонансный метод**

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 кварцевый резонатор (рис.8). При прогибе мембраны, происходит деформация кристалла кварца, подключенного в электрическую схему и его поляризация. В результате изменения давления частота колебаний кристалла меняется. Подбрав параметры резонансного контура, изменяя емкость конденсатора или индуктивность катушки, можно добиться того, что сопротивление кварца падает до нуля – частоты колебаний электрического сигнала и кристалла совпадают - наступает резонанс.

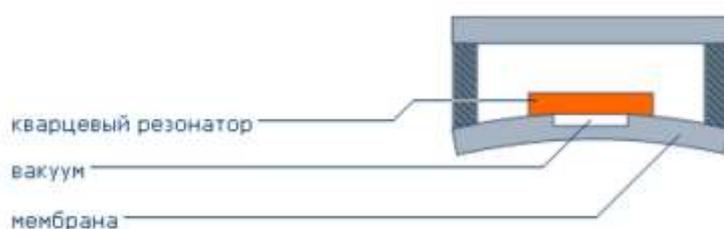


Рис.8 Упрощенный вид резонансного чувствительного элемента, выполненного на кварце.

Преимуществом резонансных датчиков является высокая точность и стабильность характеристик, которая зависит от качества используемого материала.

К недостаткам можно отнести индивидуальную характеристику преобразования давления, значительное время отклика, не возможность проводить измерения в агрессивных средах без потери точности показаний прибора.

### **Индуктивный метод**

Индукционный способ основан на регистрации вихревых токов (токов Фуко). Чувствительный элемент состоит из двух катушек, изолированных между собой металлическим экраном (рис.9). Преобразователь измеряет смещение мембраны при отсутствии механического контакта. В катушках генерируется электрический сигнал переменного тока таким образом, что заряд и разряд катушек происходит через одинаковые промежутки времени. При отклонении мембраны создается ток в фиксированной основной катушке, что приводит к изменению индуктивности системы. Смещение характеристик основной катушки дает возможность преобразовать давление в стандартизованный сигнал, по своим параметрам прямо пропорциональный приложенному давлению.



Рис. 9 Принципиальная схема индукционного преобразователя давления

Преимуществом такой системы, является возможность измерения низких избыточных и дифференциальных давлений, достаточно высокая точность и незначительная температурная зависимость. Однако датчик чувствителен к магнитным воздействиям, что объясняется наличием катушек, которые при прохождении переменного сигнала создают магнитное поле.

### Ионизационный метод

В основе лежит принцип регистрации потока ионизированных частиц. Аналогом являются ламповые диоды (рис.10).



Рис.10 Ионизационный датчик вакуума

Лампа оснащена двумя электродами: катодом и анодом, - а также нагревателем. В некоторых лампах последний отсутствует, что связано с использованием более совершенных материалов для электродов. Корпус лампы выполнен из высококачественного стекла.

Преимуществом таких лам является возможность регистрировать низкое давление – вплоть до глубокого вакуума с высокой точностью. Однако следует строго учитывать, что подобные приборы нельзя эксплуатировать, если давление в камере близко к атмосферному. Поэтому подобные преобразователи необходимо сочетать с другими датчиками давления, например, емкостными. Помимо прочего, ионизационные лампы должны оснащаться дополнительными приборами, поскольку зависимость сигнала от давления является логарифмической.