

ГЛАВА 3

ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ ВАКУУМА

3.1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВАКУУМНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Так как область давлений, используемая в вакуумной технике, перекрывает восемнадцать порядков – от 10^5 до 10^{-13} Па, то исследование характеристик вакуума в таком широком диапазоне представляет сложную задачу и практически не может быть обеспечено одним прибором. Поэтому для измерения давления разреженных газов применяются различные типы вакуумных *измерительных преобразователей*, предназначенных для преобразования давления, а точнее, величины концентрации молекул разреженного газа, в другую физическую величину. Такие преобразователи работают в составе *вакуумметров* – специальных приборов для измерения и регистрации давления разреженного газа.

В некоторых случаях степень разрежения газа в откачиваемом объеме можно количественно оценивать абсолютным давлением, т.е. силой, действующей на единицу поверхности. Тогда понятие «вакуум» приобретает смысл обычной физической величины, которую можно измерять в единицах давления. **Измерения, основанные на определении величины силы, действующей на измерительный механизм, являются абсолютными** и основаны на механических процессах – прогибе, смещении и т.п. Приборы, которые непосредственно измеряют давление газа, называются *вакуумметрами прямого действия*, или *абсолютными вакуумметрами*. Метрические свойства этих вакуумметров можно заранее рассчитать или получить с помощью градуировки по динамометрическим приборам. **Отсчет давления вакуумметров прямого действия принципиально не зависит от состава газа.** Эти приборы перекрывают диапазон давлений $10^5 - 10^{-3}$ Па. Относительная погрешность абсолютных измерений тем меньше, чем выше давление.

При малых давлениях сила становится ничтожной, а её измерение – весьма сложным. Для вакуумной метрологии само понятие «давление газа» утратило свой изначальный смысл, так как почти нет таких процессов в вакуумных системах, которые бы определялись давлением газа как усилием на поверхность. Поэтому гораздо

более **важные характеристикаи газовой среды – плотность или молекулярная концентрация газа**. Молекулярная концентрация определяет явления переноса, сорбционно-десорбционные механизмы, воздействие газа на другие процессы в вакууме. Кроме того, особое значение в качестве характеристики вакуума приобретает парциальный состав газовой смеси, оказывающий решающее влияние на характер протекания всех вакуумных явлений.

Измерения молекулярной концентрации и парциальных давлений всегда косвенные. В их основу положена зависимость параметров некоторых физических процессов, протекающих в вакууме, от концентрации газа. Таким образом, *вакуумметры косвенного действия* измеряют не само давление, а некоторую его функцию. Они, как правило, состоят из измерительного преобразователя и измерительного блока. Вакуумметры косвенного действия способны измерять давления от атмосферного до 10^{-12} Па.

Косвенные измерения нуждаются в градуировке. Градуировка вакуумметров производится путем сличения их показаний с показаниями абсолютных вакуумметров, точно определяемыми расчетным путем. Метрические характеристики промышленных вакуумметров обычно приводят для воздуха или азота. Поэтому, если шкалы вакуумметров градуируют в единицах давления, то используется *эквивалентное азотное давление*, т.е. такое давление чистого азота, которое давало бы показание вакуумметра, равное показанию при измерении давления другого газа.

Измерение парциальных давлений остаточных газов осуществляется с помощью специальных приборов – *газоанализаторов*, основанных на ионизации молекул газа с последующим разделением их по массам в электромагнитном поле.

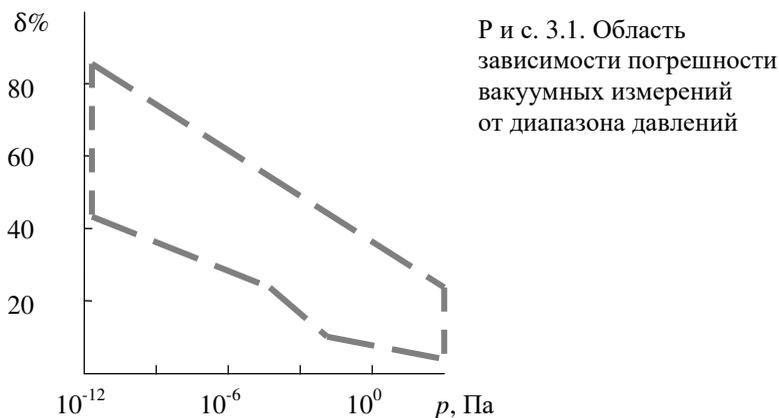
В отличие от газоанализаторов **вакуумметры измеряют суммарное давление всех компонент газовой смеси** и являются *вакуумметрами полного давления*.

Большое значение имеют требования к точности вакуумных измерений. Источниками ошибок при измерении низких давлений являются:

- отсутствие достоверных данных о составе газа;
- выделение или поглощение газа электродами или стенками датчика;

- постепенное изменение во времени градуировочной характеристики вследствие загрязнения датчика и др.

Поэтому измерение вакуума с той точностью, которая достигается во многих других областях измерительной техники, возможно только при условиях «чистого вакуума» и учете всех причин погрешностей. На практике измерения вакуума, при которых возможна ошибка в два раза, могут считаться приемлемыми. Определяющее значение для точности вакуумных измерений имеет диапазон давлений, от которого зависит возможность реализации того или иного способа измерений, что отражено на рис. 3.1.



Однако относительные измерения возможно проводить с помощью большинства вакуумметров с достаточно высокой точностью. Область давлений, в которой будут нормированы допускаемые погрешности измерений конкретного вакуумметра, представляет собой *диапазон измерений вакуумметра*. Другая важная характеристика – *чувствительность вакуумметра*, определяемая как отношение изменения сигнала на выходе вакуумметра к вызывающему его изменению давления.

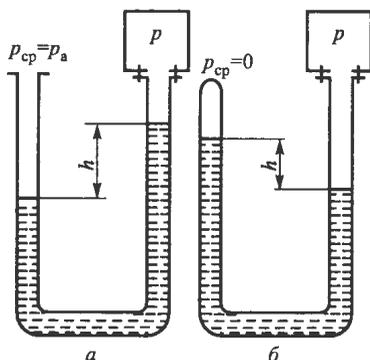
Вакуумные измерительные системы, как правило, содержат в своем составе комплекс измерительных приборов, которые делятся на *низковакуумные вакуумметры* ($\sim 10^5$ – 10^{-3} Па), предназначенные, например, для контроля процессов предварительной откачки,

высоковакуумные ($\sim 10^{-3}$ – 10^{-12} Па) – для контроля рабочего вакуума в системе, и *измерители парциальных давлений*, используемые для отслеживания параметров вакуумной среды, в которой непосредственно происходит физический процесс.

3.2. ИЗМЕРЕНИЕ ПОЛНОГО ДАВЛЕНИЯ

3.2.1. Гидростатические вакуумметры

Простейший способ непосредственного измерения давления, как физической величины, основан на **использовании закона сообщающихся сосудов**. На этом законе организована работа *жидкостных вакуумметров* с открытым и закрытым коленом. Они предназначены для измерения абсолютного давления в диапазоне от атмосферного до 1 Па.



Р и с. 3.2. Схемы жидкостных вакуумметров:

- а* – с открытым коленом;
- б* – с закрытым коленом.

В простейшем виде вакуумметр представляет собой трубку, изогнутую в виде буквы «U» (так называемый *U-образный вакуумметр*), заполненную ртутью или какой-либо другой жидкостью с низкой упругостью пара (рис. 3.2). Здесь разность давлений измеряемого p и сравнительного $p_{ср}$ уравнивается весом столба жидкости высотой h : $(p_{ср} - p) = g\rho h$, где g – ускорение земного притяжения и ρ – плотность жидкости.

Вакуумметры с открытым коленом удобны для измерения давлений, близких к атмосферному. В этом случае высота столба минимальна. **Показания прибора с открытым коленом зависят от атмосферного давления, т.е. являются относительными.**

В приборе с **закрытым коленом** перед заполнением трубки рабочей жидкостью получают возможно низкое давление $p_{\text{ср}} \ll p$, что **позволяет непосредственно измерять абсолютное давление в вакуумной системе**. В этом случае показания вакуумметра не зависят от атмосферного давления. При измерении давлений меньших 10^4 Па жидкостный вакуумметр с закрытым коленом имеет меньшие габариты, чем вакуумметр с открытым коленом.

Для повышения точности измерений используется рабочая жидкость с меньшей плотностью. Так, например, плотность вакуумного масла в 15 раз меньше плотности ртути. Пределы измерения ртутных манометров 10^2 – 10^5 Па, а масляных – 1 – 10^4 Па. Погрешность при отсчёте h может составлять 0,1 мм и ограничена непостоянством поверхностного натяжения, колебаниями плотности, температурных градиентов рабочей жидкости и т.д.

Для расширения нижнего предела измерений вакуумметра можно применить сжатие (компрессию) по закону Бойля–Мариотта, что позволяет производить абсолютные измерения давлений до 10^{-3} Па. Такой метод сжатия реализуется в *компрессионном вакуумметре*.



Р и с. 3.3. Схема компрессионного вакуумметра

Вакуумметр (рис. 3.3) состоит из измерительного баллона 1 с капилляром и соединительной трубки 2 с ответвлением для отсчета показаний. Рабочая жидкость (ртуть, масло) подается в систему из резервуара. Перед началом измерений она находится на уровне ниже ответвления соединительной трубки. При измерения давлени-

ния p в откачанной вакуумной системе рабочая жидкость поднимается вверх и сжимает заключенный в баллоне газ до давления, которое можно непосредственно измерить по разности уровней h в закрытом и сравнительном капиллярах. Уравнение компрессионного вакуумметра имеет следующий вид: $pV_0 = (p + \rho gh)V$, где p – измеряемое давление; V_0 – начальный объем сжимаемого газа; V – конечный объем сжатого газа; ρ – плотность рабочей жидкости. Работа жидкостных вакуумметров связана с некоторыми особенностями:

- вакуумметры должны подсоединяться к вакуумной системе через азотную ловушку, так как пары рабочей жидкости могут попасть в вакуумную систему;
- компрессорным вакуумметром нельзя проводить непрерывные измерения, только разовые, что связано с процедурой поднятия и последующего опускания жидкости перед измерением.

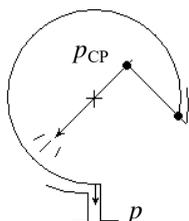
Нижний предел измеряемых компрессионным вакуумметром давлений определяется его геометрическими размерами. По технологическим соображениям не удастся получить коэффициент компрессии более 10^5 . Жидкостные вакуумметры являются абсолютными, поэтому их можно использовать в качестве образцовых при градуировке других приборов.

3.2.2. Деформационные вакуумметры

Другим способом определения физической силы давления газа является **использование в качестве меры давления механической деформации чувствительного элемента**. Данную деформацию можно связать с градуированным указателем и таким образом сделать возможным отсчет давления по шкале. К достоинствам *деформационных вакуумметров* так же, как и в случае жидкостных, относится **непосредственное измерение давления газа**. Кроме того, в этих приборах нет необходимости в применении газовых ловушек. Различаются деформационные вакуумметры по типу применяемого упругого чувствительного элемента преобразователя и способу измерения деформаций.

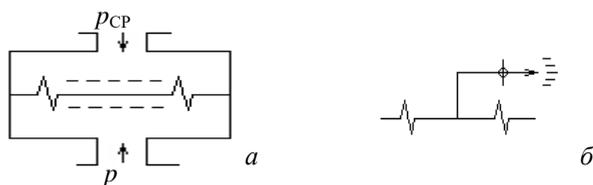
Трубчатые вакуумметры чаще всего применяются для измерения давления вблизи атмосферного, например трубки Бурдона

(рис. 3.4). Спиральная полая трубка скручивается под действием атмосферного давления при откачке внутренней полости за счет разных радиусов кривизны наружной и внутренней поверхностей. Опорное давление в таком преобразователе равно атмосферному, т.е. измерение проводится в относительных единицах. Предел измерений 10^2 – 10^5 Па с погрешностью 5 %.



Р и с. 3.4. Схема деформационного трубчатого вакуумметра

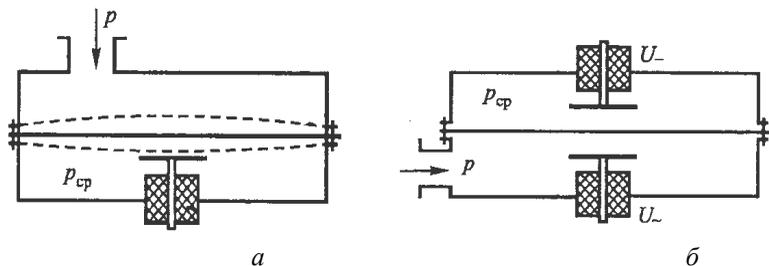
Более чувствительными являются *мембранные вакуумметры* с чувствительным упругим элементом в виде тонкой мембраны. Они различаются по способу регистрации деформаций и методу измерений. В общем случае мембранные вакуумметры имеют две вакуумно-изолированные камеры (рис. 3.5, а), разделенные мембраной. Деформация мембраны пропорциональна разности давлений: $(p_{cp} - p) = kx$, где k – коэффициент пропорциональности, а x – смещение, деформация мембраны. Здесь реализуются дифференциальные измерения, однако при условии $p_{cp} \ll p$ измеряется абсолютное давление в вакуумной системе.



Р и с. 3.5. Схема деформационного мембранного вакуумметра (а) и стрелочного указателя (б)

Смещение мембраны регистрируются в простейших мембранных преобразователях стрелочными указателями (рис. 3.5, б). В современных чувствительных мембранных вакуумметрах для регистрации смещения мембраны широко используются электрические

методы. Один из них заключается в определении электрической ёмкости между мембраной и вспомогательным неподвижным электродом (рис. 3.6, а), второй – в измерении индуктивности катушки, в которую вдвигается металлический сердечник, связанный с мембраной.



Р и с. 3.6. Типы мембранного вакуумметра

Верхний предел измерения мембранных вакуумметров ограничивается пределом упругости материала мембраны и возникающими остаточными деформациями. Нижний предел – уменьшением чувствительности и точностью отсчета малых смещений. При этом учитывается, что **линейность показаний таких преобразователей наблюдается только при небольших смещениях мембраны**. Именно поэтому широко используются методы с компенсацией смещения мембраны электрическим или механическим воздействием, приводящим мембрану в исходное состояние (нулевой метод измерения). При электрическом методе постоянный потенциал на ещё одном дополнительном электроде (рис. 3.6, б) приводит к возникновению электростатических возвращающих сил, компенсирующих отклонение мембраны: $F_{\text{э}} = -dW/dx$, где W – энергия электрического поля, а x – расстояние между мембраной и дополнительным электродом. Подставляя выражение для W , получаем

$$F_{\text{э}} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon}{2} \left(\frac{U}{x} \right)^2 \pi R^2,$$

где U – приложенная разность потенциалов; R – радиус дополнительного электрода. Поэтому разность давлений в приборе будет пропорциональна квадрату постоянного компенсирующего напряжения. Смещение мембраны измеряется емкостным методом с по-

мощью переменного напряжения на другом вспомогательном электроде.

В зависимости от диапазона измерений и условий эксплуатации мембраны изготавливают из различных материалов (нержавеющая сталь, ковар, кварц и т.д.). Диаметр мембран достигает 120 мм при толщине 10 мкм. Диапазон измерения вакуумметров составляет 10^5 – 10^{-1} Па, но один прибор регистрирует в пределах 2–3 порядков. Для мембранно-емкостных преобразователей верхний предел измерений ограничивается пробойным напряжением между обкладками, а нижний – порогом чувствительности емкостного моста для измерения емкости промежутка мембрана – электрод.

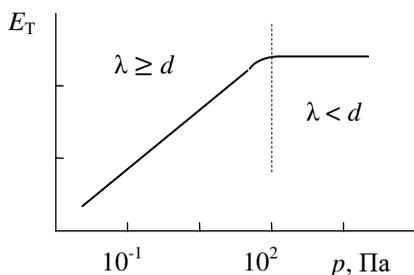
3.2.3. Тепловые вакуумметры

Из всех газокинетических явлений в настоящее время широкое использование для измерения давления получила лишь *теплопроводность газов*, которая положена в основу теплоэлектрических преобразователей.

Такие явления переноса, как вязкость и диффузия, также могут быть использованы для измерения давления, но конструкции вакуумметров, созданных на их основе, отличаются повышенной сложностью и требуют квалифицированного и бережного обращения. В них могут использоваться явления переноса энергии (электрической и тепловой) молекулами газа либо от движущейся поверхности к неподвижной, либо от нагретой поверхности к охлажденной (так называемый радиометрический эффект). Вакуумметры такого типа способны измерять абсолютные давления в условиях сверхвысокого вакуума, однако действующие в них силы очень малы. Поэтому такие приборы в основном находят специальное лабораторное применение.

Принцип действия *тепловых вакуумметров* основан на зависимости теплопроводности газа от его давления, т.е. в данном случае реализуются косвенные измерения давления. Для измерения давления в газ вводится нагреваемый элемент, и по температуре его поверхности, зависящей от теплоотвода через газ, возможно далее судить о величине давления. На рис. 3.7 представлена зависимость от давления теплового потока через разреженный газ. В области низкого вакуума длина свободного пробега молекул газа λ

меньше расстояния между поверхностями d , теплопроводность газа не зависит от давления. Со снижением давления, когда λ сравнивается с расстоянием между нагреваемым элементом и стенками прибора, обмен энергиями между поверхностями будет осуществляться уже отдельными молекулами, пролетающими это расстояние без соударений. Снижение концентрации молекул вызовет уменьшение общего потока теплообмена между поверхностями, т.е. появится зависимость теплового потока от давления. Таким образом, **тепловой вакуумметр работает в области среднего и высокого вакуума**, а переход от низкого вакуума к среднему является верхним пределом измерения теплового вакуумметра.



Р и с. 3.7. Зависимость теплопроводности газа от давления для коаксиальной цилиндрической системы из баллона радиусом d и тонкой металлической нити

Как правило, в качестве нагревательного элемента используется тонкая металлическая нить, нагреваемая пропускаемым по ней электрическим током. Нить располагается внутри баллона вакуумного датчика. Уравнение теплового баланса такого преобразователя можно записать в следующем виде:

$$I^2 R = E_K + E_T + E_H + E_M, \quad (3.1)$$

где I – ток накала нити; R – сопротивление нити; E – потери теплоты (потоки) за счет конвекции (E_K), теплопроводности газа (E_T), излучения нити (E_H) и теплопроводности материала нити (E_M).

Конвекционным теплообменом в области среднего и высокого вакуума можно пренебречь, т.е. $E_K \approx 0$.

Потери тепла за счет теплопроводности газа:

$$E_T = \nu \cdot (E_H - E_H) \cdot A,$$

где ν – частота столкновений молекул с поверхностью; A – площадь поверхности нити; E – тепловая энергия молекулы газа, соответствующая либо температуре нити T_H , либо температуре по-

верхности колбы (газа) T_{II} . Подставляя выражения для ν и E , получим

$$E_T = \frac{nv}{4} \frac{3}{2} k (T_H - T_{II}) A = c \frac{p}{kT} \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}} \cdot \Delta T \cdot A = K_T \cdot \Delta T \cdot p,$$

где произведение $K_T p$ – коэффициент теплопроводности газа, уменьшающийся со снижением давления.

Однако, говоря о переносе тепла в высоком вакууме, следует учитывать, что при соударении молекулы газа с поверхностью не происходит полный обмен энергии. Поэтому нужно вводить коэффициент аккомодации α , характеризующий эффективность энергообмена между молекулами и нагретым телом. Численные значения этого коэффициента находят из уравнения

$$\alpha = (T'' - T') / (T_H - T'),$$

где T' , T'' – температуры, соответствующие средним энергиям молекул, приходящих к нагретому телу и уходящих от него.

Уравнение измерения для теплового преобразователя получается из уравнения теплового баланса (3.1):

$$p = (I^2 R - E_{II} - E_M) / (K_T (T_H - T_{II})). \quad (3.2)$$

Отсюда следует, что чем меньше сумма потерь тепла ($E_{II} + E_M$) по сравнению с подводимым теплом $I^2 R$, тем выше чувствительность датчика. Слагаемое E_M можно сделать относительно малым, если использовать достаточно тонкие и длинные нити. Что касается величины E_{II} , то она определяется температурой нити и подбирается в зависимости от режима работы преобразователя.

Нижний предел измерения преобразователя определяет условие

$$(I^2 R - E_{II} - E_M) > 0,01 I^2 R.$$

При очень низких давлениях, когда $\lambda \gg d$, отвод тепла через газ становится пренебрежимо малым по сравнению с тепловым излучением и потерями тепла через металлические вводы.

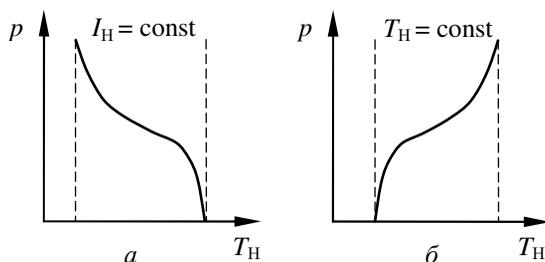
При высоких давлениях газа, когда $\lambda \ll d$, нарушаются условия молекулярного переноса и теплопроводность перестает зависеть от давления. Теплопровод с нити в основном осуществляется за счет возникающей конвекции газа, которая может быть использована только для индикации высоких давлений.

Из уравнения измерения (3.2) видно, что давление является функцией двух переменных: тока накала нити I и температуры

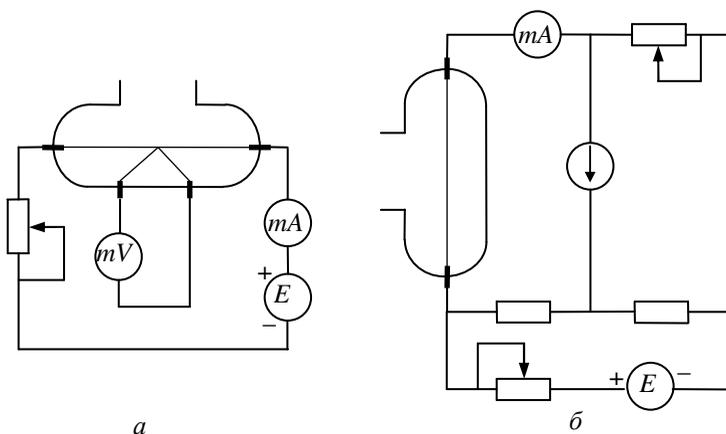
нити T_H . Поэтому существуют два способа организации работы тепловых вакуумметров:

- фиксировать ток I и измерять изменяющуюся с давлением разность температур ($T_H - T_{II}$);
- поддерживать T_H на фиксированном уровне регулировкой величины тока I и по ней судить об изменении давления.

Соответственно применяются два метода измерения давления тепловым вакуумметром – *постоянного тока* и *постоянной температуры*. Градуировочные характеристики теплового преобразователя для двух методов показаны на рис. 3.8.



Р и с. 3.8. Градуировочные характеристики теплового преобразователя:
 a – при постоянном токе; b – при постоянной температуре



Р и с. 3.9. Схемы тепловых вакуумметров:
 a – термопарного; b – сопротивления (Пирани)

В зависимости от способа измерения температуры тепловые преобразователи делятся на *термопарные* и преобразователи *сопротивления*. В термопарном преобразователе (рис. 3.9, а) температура нити измеряется термопарой. ТермоЭДС термопары регистрируется милливольтметром. В преобразователе сопротивления (рис. 3.9, б) определение температуры нити производится через зависимость сопротивления R от температуры: $R = R_0(1 + \beta T_H)$. Для измерения R применяется мостовая схема с уравнивающим сопротивлением. Оба преобразователя могут работать как в режиме постоянного тока накала, так и в режиме с постоянной температурой нити.

Показания тепловых преобразователей определяются произведением $K_T p$ (3.2), где $K_T \propto (\pi m k T)^{-1/2}$. Таким образом, **показания преобразователей зависят от рода газа**: $p \sim m^{1/2}$. При этом для разных газов при постоянной температуре нити выполняется соотношение

$$K_{T1} p_1 = K_{T2} p_2 = K_{T3} p_3 = \dots$$

Выпускаемые промышленностью приборы проградуированы по сухому воздуху, поэтому все их показания будут выражены в воздушном эквиваленте (или азотном – $m_{\text{возд}} \approx m_{\text{N}_2}$). Если необходимо измерить давление других газов, то нужно учитывать *относительную чувствительность* теплового преобразователя к i -му газу $C_i = K_{ТВ}/K_{Ti}$, где $K_{ТВ}$ – коэффициент по воздуху. Тогда давление i -го газа p_i пересчитывается по показаниям вакуумметра p_B в воздушном эквиваленте: $p_i = p_B C_i$. Значения C_i для различных газов по отношению к воздуху могут отличаться в несколько раз, например для криптона $C_{Kr} \approx 2,5$.

Если преобразователь измеряет давление смеси газов, то его показания также будут выражены в воздушном эквиваленте:

$$p_B K_{ТВ} = K_{T1} p_1 + K_{T2} p_2 + K_{T3} p_3 + \dots$$

Так как для смеси газов $p_B = p_{\text{см}}/C_{\text{см}}$, то можно записать

$$\frac{p_{\text{см}}}{C_{\text{см}}} = \frac{p_1}{C_1} + \frac{p_2}{C_2} + \frac{p_3}{C_3} + \dots$$

Разделив обе части данного выражения на $p_{\text{см}}$, получим

$$\frac{1}{C_{\text{см}}} = \frac{V_1}{C_1} + \frac{V_2}{C_2} + \frac{V_3}{C_3} + \dots,$$

где V_i – объемные концентрации соответствующих газов. Таким образом, коэффициент относительной чувствительности для смеси газов определяется по формуле

$$\frac{1}{C_{\text{см}}} = \frac{\sum V_i}{\sum C_i}, \text{ причем } \sum V_i = 1.$$

Тепловые вакуумметры обеспечивают косвенные измерения полных давлений и используются в вакуумных системах для непрерывного контроля процесса получения низкого и среднего вакуума. Диапазон рабочих давлений традиционных преобразователей $5 \cdot 10^3 - 10^{-1}$ Па, погрешность измерений $\pm 30\%$. Инерционность показаний, связанная с тепловой инерцией нити, максимальна при низких давлениях и составляет секунды. Лучшие характеристики имеют преобразователи, изготовленные на тонкой кремниевой мембране – тензорезисторы (до 10^{-3} Па).

3.2.4. Ионизационные вакуумметры

В основе работы *ионизационных вакуумметров* лежат явления ионизации, т.е. выбивание электрона из атома или молекулы и образование пары положительно заряженного иона и электрона. Образующиеся в объеме свободные заряды обуславливают проводимость газового промежутка или – возникновение газового разряда. В первом случае **мерой степени разрежения газов** может служить **величина тока положительных ионов**, во втором – **величина разрядного тока**. Такие измерения давления газов очевидно **являются косвенными**.

Ионизационные преобразователи различаются по способу получения ионизирующих частиц. Так, в термоэлектронных преобразователях частичная ионизация разреженного газа производится электронами, эмитируемыми из накаливаемых катодов, в магнитных электроразрядных – вторичными электронами, выбитыми ионами из холодных катодов, а в радиоизотопных – источниками радиоактивного излучения. Наиболее часто для ионизации газа применяется бомбардировка ускоренными электронами.