

СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ НИЗКИХ И СВЕРХНИЗКИХ ДАВЛЕНИЙ В ГАЗОВОЙ СРЕДЕ

Е. А. Денисов

Физический факультет Санкт-Петербургского государственного университета,
Санкт-Петербург

Задача измерения давления в вакуумных системах является не менее важной, чем получение вакуума. Практически все вакуумные системы, от низковакуумных до сверхвысоковакуумных, содержат датчики для регистрации в них давления. Однако в силу того, что диапазон давлений, применяемых в науке и технике, чрезвычайно широк (от атмосферного давления до менее чем 10^{-12} Торр), на настоящий момент не существует методики и физических принципов, которые позволили бы создать идеальный универсальный датчик давления «на все случаи жизни». В связи с этим, при выборе способа и аппаратуры для измерения низких давлений необходимо принимать во внимание целый ряд моментов, которые могут быть существенны в конкретном приложении. Например, температурная и временная стабильность, воспроизводимость показаний, зависимость показаний от состава газа и т. д.

В обзоре рассматриваются физические принципы работы, характеристики, достоинства и ограничения различных датчиков полного давления, применяемых в вакуумной технике. Особое внимание уделяется вопросам прецизионных измерений давления и калибровки датчиков.

Введение

Для того, чтобы представить себе, насколько широко вакуумные технологии вошли в современное производство, науку, технику, можно попробовать ответить на вопрос: а где они не используются? Полагаю, что ответ на этот вопрос потребует заметных умственных усилий. Скорее всего, вы его найдете, но это будут технологии позапрошлого века и ранее. Сейчас же вакуумная техника прочно вошла практически во все сферы человеческой деятельности. Среди них сельское хозяйство, пищевая промышленность, фармакология, медицина, металлургия, строительство, научная аппаратура, ускорители элементарных частиц, прототипы термоядерных реакторов и многие другие.

Различные сферы применения вакуумной техники имеют специфические требования к вакууму (см. табл. 1). Соответственно, приборы для измерения вакуума в каждом конкретном приложении также должны обладать характеристиками, необходимыми и достаточными в данном случае. Например, для измерения разрежения в доильном аппарате применение прибора с погрешностью 0,1 Торр будет избыточным, дорогостоящим и неоправданным решением.

Таблица 1

Вакуум в науке, технике и природе

Доильные аппараты:	360–400 Торр
Вакуумная упаковка	1–3 Торр
Вакуумная сушка:	~1 Торр
Вакуумное напыление:	10^{-1} – 10^{-5} Торр
Вакуумная плавка:	10^{-3} – 10^{-6} Торр
Источники синхротронного излучения:	10^{-9} – 10^{-10} Торр
Адронный коллайдер:	10^{-11} – 10^{-12} Торр
Космическое пространство	до 10^{-16} Торр

К важным параметрам вакуумметров можно отнести следующие:

- диапазон измерений,
- принцип измерения давления, заложенный в вакуумметре,
- точность измерений,
- воспроизводимость показаний,
- наличие эффекта гистерезиса,
- разрешение,
- стабильность показаний (во времени и в зависимости от температуры),
- зависимость показаний от типа газа,
- возможность измерения давления химически активных газов,
- наличие откачного эффекта,
- требования к материалам вакуумного датчика, контактирующих с вакуумом,
- наличие аналогового и(или) цифрового (RS232, RS485, USB) выхода,
- уровень максимально допустимого давления,
- прочность конструкции и узлов вакуумного датчика,
- чувствительность к магнитным и электромагнитным полям,
- тип присоединяемого фланца (CF, NW, tube),
- надежность вакуумметра,
- наличие сертификата о внесении вакуумметра в Реестр средств измерений РФ,
- необходимость и сложность калибровки вакуумметра,
- стоимость вакуумметра.

Принцип работы вакуумметра является одним из наиболее важных его параметров, поскольку он во многом определяет подавляющее большинство других его характеристик. Принцип работы прибора напрямую связан с тем, какой параметр объекта (в данном случае газа) непосредственно измеряется датчиком. По этому критерию все вакуумметры можно разделить на 4 группы:

- Приборы, измеряющие гидростатическое давление газа. К ним относятся:
 - жидкостные манометры;
 - деформационные манометры и вакуумметры;
- Приборы, основанные на зависимости теплопроводности газов от давления:

- вакуумметр Пирани;
- термопарный вакуумметр;
- Приборы, основанные на зависимости вязкости газов от давления:
 - ротационный вакуумметр;
- Приборы, основанные на зависимости ионизации в газе от давления:
 - термоэмиссионные вакуумметры;
 - вакуумметры с холодным катодом;
 - экстракторные вакуумметры.

Ниже будут рассмотрены физические явления и принципы, лежащие в основе функционирования перечисленных приборов для определения полного давления в разреженных газах.

Жидкостные вакуумметры

Жидкостные (гидростатические) вакуумметры – одни из первых приборов для измерения давления разреженных газов. Они имеют крайне простую и надежную конструкцию, представленную на рис. 1. U-образная трубка частично заполняется жидкостью с низким давлением насыщенных паров и одним из концов соединяется с вакуумной системой. Второй конец прибора может оставаться открытым на атмосферу или быть запаянным. Во втором случае, как правило, запаянное колено исходно полностью заполняется жидкостью.

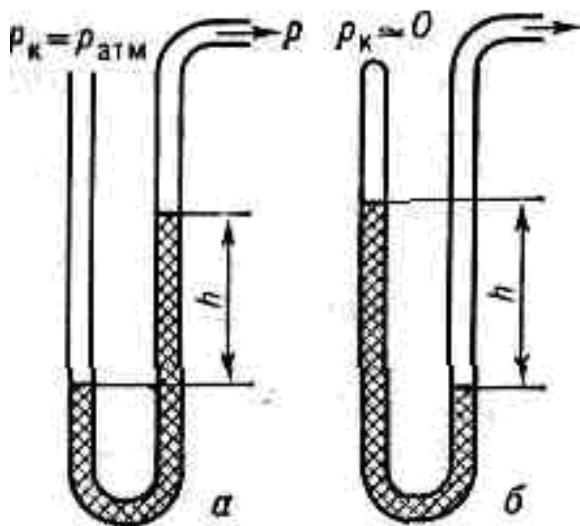


Рис. 1. Устройство жидкостного (гидростатического) U-образного вакуумметра: а – с открытым коленом, б – с закрытым коленом.

Величина давления в системе определяется на основе законов гидростатики исходя из разницы высот уровней в левом и правом коленах вакуумметра:

а) $p = p_{\text{атм}} - \rho gh$ – для конструкции с открытым коленом,

б) $p = p_{\text{нп}} + \rho gh$ – для конструкции с запаянным коленом, где $p_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, $p_{\text{нп}}$ – давление насыщенных паров жидкости в запаянном колене.

Диапазон давлений, измеримых жидкостными вакуумметрами, определяется их конструкцией и применяемой жидкостью. Используя специальные вакуумные масла с низкой плотностью и давлением насыщенных паров, можно измерять давления в диапазоне 1000–1 Торр. С применением специальной оптики этот диапазон может быть расширен до 10^{-3} Торр.

К достоинствам данного типа вакуумметров можно отнести их простоту, надежность, независимость показаний от состава газа. Их можно использовать для градуировки и поверки других вакуумметров.

Недостатками гидростатических вакуумметров является их громоздкость, малый динамический диапазон, сложность преобразования показаний в электрический сигнал. Кроме этого, применяемые масла могут растворять газы, а применение ртути затруднено из-за ее токсичности.

Компрессионные вакуумметры

Изобретение компрессионных вакуумметров позволило расширить диапазон измерений давлений в область низких давлений до 10^{-5} Торр. Наиболее известным прибором этого типа является вакуумметр Мак–Леода, схематическое изображение которого представлено на рис. 2. Он состоит из баллона известного объема V , двух капилляров одинаковых диаметров, трубки, соединяющей вакуумметр с вакуумной системой, и резервуара с ртутью, снабженного напускным клапаном. Перед измерением давления уровень ртути должен лежать ниже уровня А (рис. 2).

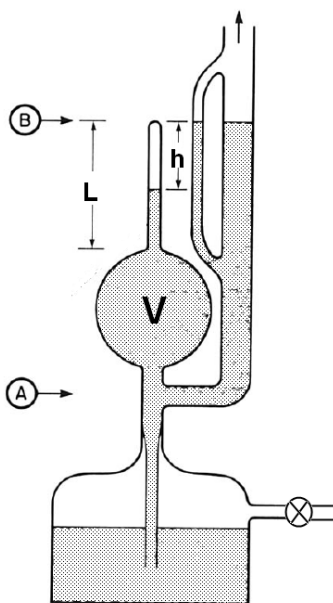


Рис. 2 Вакуумметр Мак–Леода

Давление в баллоне равно давлению в вакуумной системе p . Процедура измерения давления сводится к напуску ртути из резервуара с помощью клапана до момента достижения уровня ртути в правом капилляре положения В (уровня конца запаянного капилляра). При этом объем газа V , отсеченный в точке А от вакуумной системы, сжимается (компрессируется) до объема $h \cdot S$, где h – высота столба газа в закрытом капилляре, S – площадь сечения капилляра. В силу закона Бойля-Мариотта для изотермического сжатия:

$$pV = (p + \rho gh)Sh,$$

где ρ – плотность ртути, g – ускорение свободного падения. Поскольку $p \ll \rho gh$, данное равенство может быть переписано в виде

$$pV = \rho gSh^2.$$

Описанная процедура позволяет нанести квадратичную шкалу, градуированную непосредственно в единицах давления, рядом с закрытым капилляром. В силу принципа работы вакуумметр Мак–Леода не подходит для непрерывного измерения давления. Также имеются сложности в измерении с его помощью давления легко конденсируемых паров. Использование данного вакуумметра требует значительных трудозатрат и опыта работы. Для его функционирования требуется большое количество токсичной ртути (5–10 кг). Перечисленные негативные моменты привели к тому, что в последнее время данный тип вакуумметра на практике используется крайне редко.

Тем не менее вакуумметры компрессионного типа все же находят свое применение в лабораториях, например, для калибровки других вакуумметров. Они, как правило, требуют заметно меньшее количество ртути и гораздо более удобны в эксплуатации, чем вакуумметр Мак–Леода. К таким приборам относятся, например, вакуумметр Мозера и Vacustat, имеющие сходный принцип действия и требующие всего от 80 до 300 г ртути (см. рис. 3).

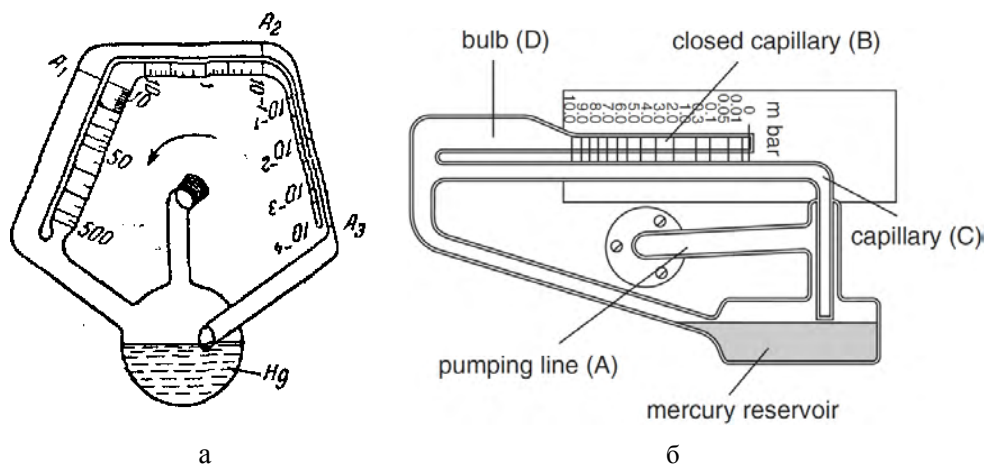


Рис. 3. Вакуумметр Мозера (а) и Vacustat (б)

Они соединяются с вакуумной установкой при помощи шлифа, вокруг которого прибор может поворачиваться. Перед началом измерений прибор

располагают таким образом, чтобы резервуар со ртутью оказался в нижнем положении. Измерения проводят проворачивая прибор на шлифе против часовой стрелки, пока измерительный капилляр не окажется в вертикальном положении. При этом давление определяется по уровню ртути в капилляре с помощью шкалы, проградуированной в единицах давления. Нижний предел давления, доступный для измерения вакуумметром Мозера составляет 10^{-4} мбар, а Vacustat – 10^{-2} мбар.

Деформационные вакуумметры

Действие деформационных вакуумметров основано на определении упругой деформации чувствительного элемента, в качестве которого могут выступать сильфон, мембрана, спиральная трубка и др. Регистрация степени деформации производится с помощью механических связей, соединяющих чувствительный элемент со стрелкой прибора (такие приборы называются, как правило, манометрами), либо при помощи электронных преобразователей (пьезоэлектрических, емкостных). Как и жидкостные, деформационные вакуумметры определяют непосредственно величину гидростатического давления и их показания не зависят от состава газа, что является их важным достоинством.

Среди механических манометров широкое распространение получили приборы на основе трубки Бурдона – трубки овального сечения, запаянной с одного конца и согнутой в виде дуги окружности или спирали. Открытый конец трубки соединяется с объемом, в котором производится измерение давления. Под действием внешнего и внутреннего давления, а также сил упругих деформаций в самой трубке, она меняет свою форму, слегка распрямляясь при увеличении давления в трубке. Перемещение запаянного конца трубки передается на стрелку, расположенную напротив шкалы (см. рис. 4).

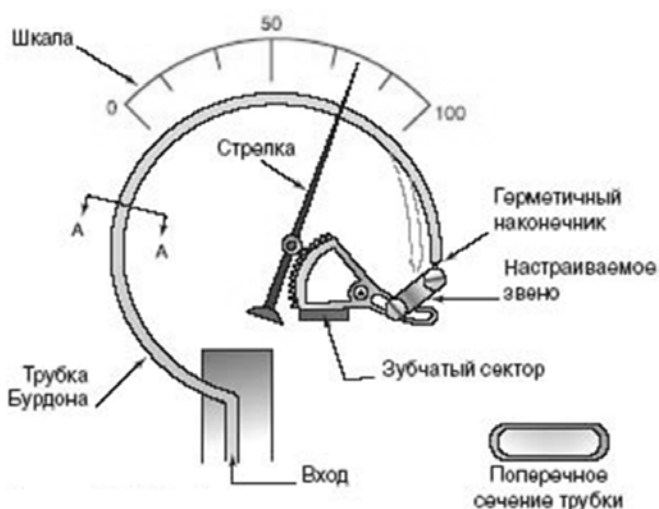


Рис. 4. Манометр на основе трубки Бурдона

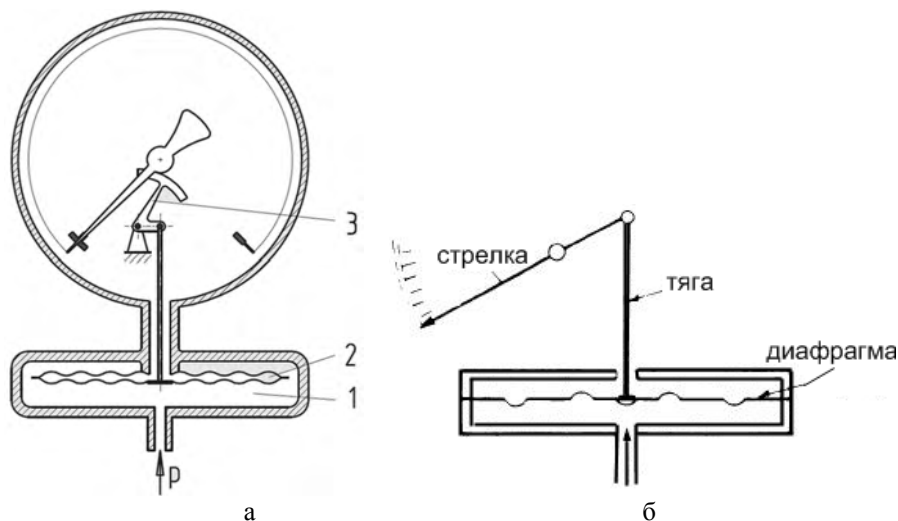


Рис. 5. Устройство капсульного (а) и мембранного (б) манометра: 1 – измерительная камера, 2 – капсульный элемент, 3 – механизм передачи движения на стрелку

Также для измерения низких давлений применяются капсульные (рис. 5,а) и диафрагменные (рис. 5,б) деформационные манометры. К достоинствам механических деформационных манометров можно отнести также их сравнительно низкую стоимость, отсутствие жидкости и критичных стеклянных деталей, высокую надежность прибора. С их помощью можно производить измерения давления в диапазоне от единиц миллибар до атмосферного давления.

Среди деформационных вакуумметров с электронной системой регистрации давления наиболее широкое распространение получили емкостные датчики, в которых перемещение чувствительной мембраны регистрируется по изменению электрической емкости между неподвижным электродом и мембраной (см. рис. 6). Данный тип вакуумных датчиков обладает высокой точностью и чувствительностью, а также высокой скоростью измерений. К сожалению, емкостные датчики, как правило, обладают значительным температурным дрейфом, поэтому модели, предназначенные для прецизионных измерений, снабжаются устройством температурной стабилизации, что приводит к увеличению и без того весьма высокой стоимости прибора. Как правило, диапазон измерений датчика составляет 4 декады измеряемого давления. То есть, если верхний предел составляет 10 Торр, то нижний предел чувствительности равен 1 мТорр. В настоящий момент нижний предел измерений, обеспечиваемый емкостными датчиками, составляет 10^{-1} мТорр.

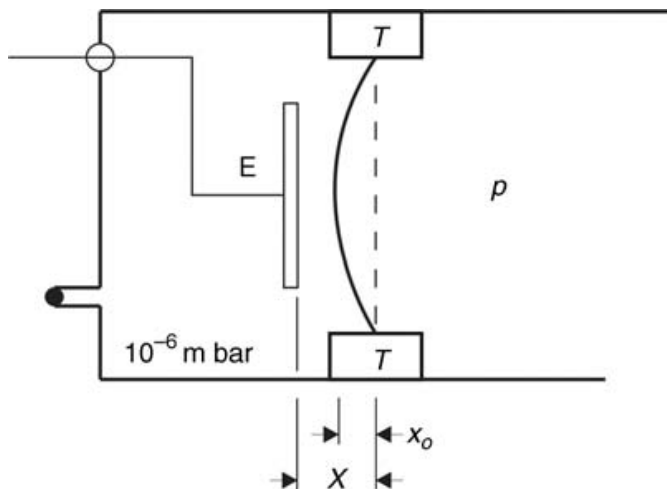


Рис. 6. Устройство емкостного деформационного датчика

Пьезоэлектрические деформационные вакуумметры по сравнению с емкостными имеют меньшую чувствительность (1–1000 Торр), но при этом более компактны, просты в изготовлении и их стоимость ниже.

Датчики теплопроводности газа

Датчики давления, основанные на зависимости тепловых потерь нагретых тел в зависимости от давления газа, в настоящее время являются, пожалуй, самыми распространенными для определения давления от атмосферного и до 10^{-3} Торр. Причина их популярности кроется в простоте изготовления и эксплуатации, высокой надежности и низкой стоимости.

Вакуумметр Пирани – самый ранний из датчиков косвенного измерения вакуума, применяющийся по сей день. Он представляет собой колбу с заключенной в нее платиновой или титановой проволокой, нагреваемой проходящим током до температуры 320°C . Изменение теплоотвода от проволоки, связанное с изменением давления, приводит к изменению температуры проволоки и, следовательно, ее сопротивления. Сопротивление проволоки определяется с помощью электронной схемы, входящей в состав контроллера. Диапазон измеряемых давлений составляет 10^{-3} –100 Торр, а с учетом конвективных потерь тепла – до 760 Торр.

Термопарный вакуумметр имеет сходный принцип действия, отличающийся от вакуумметра Пирани лишь способом измерения температуры. В данном случае температура проволоки 1 определяется с помощью приваренной к ней термопары 2 (см. рис. 7).

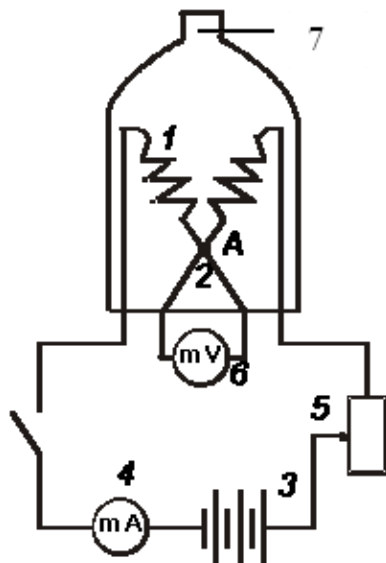


Рис. 7. Устройство термопарной лампы и схема ее включения:

- 1 – нить накала; 2 – термопара; 3 – источник питания;
- 4 – измеритель тока накала; 5 – регулятор тока накала;
- 6 – измеритель термо-ЭДС; 7 – соединительный патрубкок

Типичный диапазон измеримых давлений для термопарного датчика составляет 10^{-3} –1 Торр.

Вакуумметры, основанные на определении теплопроводности газов чувствительны к составу газовой смеси, поскольку разница в теплопроводности различных газов может составлять до 20 раз. Поэтому на их численные показания можно полагаться лишь в случае измерения давления газовой смеси, по которой датчик прокалиброван (заводские установки соответствуют калибровке по сухому воздуху). В противном случае такие вакуумметры могут быть использованы для мониторинга изменения давления в вакуумной системе.

Ионизационные вакуумметры

Для повседневного измерения высокого и сверхвысокого вакуума вакуумметры данного типа являются практически незаменимыми. В настоящее время используются ионизационные вакуумметры двух основных видов. В приборах с горячим катодом электроны, эмитированные с нагретой поверхности и ускоренные электрическим полем, ионизируют молекулы газа. Под действием электрического поля ионы собираются на коллекторе, вызывая появление ионного тока. Величина ионного тока в определенном интервале давлений линейно зависит от концентрации молекул и может служить для определения давления. В датчиках с холодным катодом ионный ток создается за счет процессов в самостоятельном газовом разряде, образующемся под действием электрического и магнитного полей. И так же, как в датчиках с горячим катодом, величина тока в разряде служит для определения давления в вакуумной системе.

Датчики с горячим катодом

Датчики этого типа представляют собой трехэлектродную лампу, включенную по схеме, представленной на рис. 8. Электроны, эмитируемые раскаленным катодом, ускоряются под действием положительного потенциала сетки и, пролетая сквозь нее, попадают в пространство между сеткой и коллектором. В результате электронного удара нейтральные молекулы ионизируются и увлекаются отрицательным потенциалом к коллектору (аноду), ток на котором служит для определения давления газа. Первоначально конструкция датчика имела цилиндрическую симметрию (рис. 9,а). При этом катод размещался на оси цилиндра, а коллектор представлял собой внешнюю сплошную цилиндрическую поверхность. Такое расположение электродов позволяет проводить измерение давления не ниже 10^{-7} Торр. Основным фактором, ограничивающим снизу диапазон измеримых давлений, является появление токов, не связанных с ионизацией молекул электронным ударом. Главным механизмом появления паразитного тока является следующий фактор. В результате столкновения электронов с сеткой образуются рентгеновские кванты с энергией до 180 эВ, которые, попадая на поверхность коллектора, приводят к образованию фотоэлектронов, вносящих заметный вклад в ток коллектора.

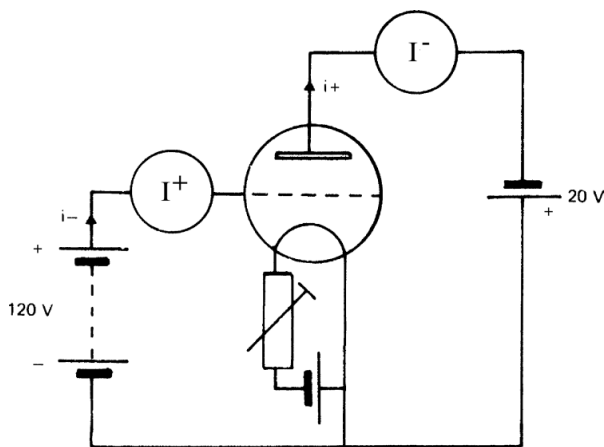


Рис. 8. Схема включения ионизационного датчика с горячим катодом

В лампе Байярда–Альперта (рис. 9,б) этот эффект существенно уменьшен за счет того, что коллектор представляет собой тонкий проводник, расположенный на оси цилиндрической сетки. Катод при этом располагается снаружи сетки. Поскольку площадь коллектора намного меньше, чем в традиционной ионизационной лампе, то вероятность выбивания фотоэлектронов ниже, а, следовательно, ниже паразитный ток, вызываемый рентгеновским излучением. Диапазон давлений, измеримых при помощи лампы Байярда–Альперта, составляет 10^{-3} – 10^{-10} Торр. Применение горячего катода приводит к заметному газовыделению из лампы, особенно в начале работы. Поэтому для измерения сверхнизких давлений рекомендуется проводить предварительную дегазацию датчика при температуре до 250 °С. Зачастую контроллер вакуумметра позволяет проводить дегазацию коллектора и сетки электронным ударом. Для

уменьшения термического влияния катода часто применяются катоды с низкой работой выхода электронов. Например, с покрытием из гексаборида лантана. Тем не менее, катоды с покрытием следует применять с осторожностью, поскольку испарение материалов с малой работой выхода и осаждение их на коллекторе может приводить к существенному увеличению паразитного тока.

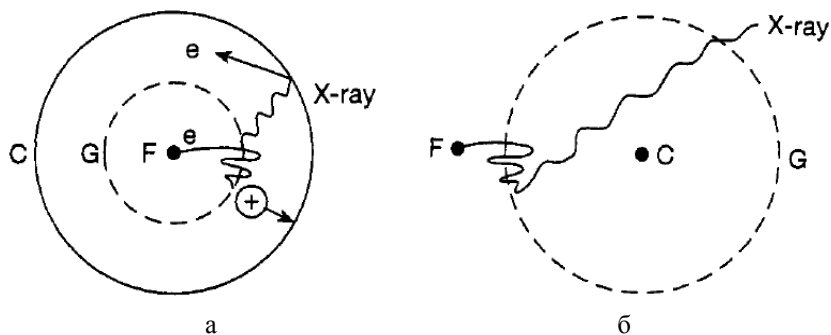


Рис. 9. Традиционный ионизационный датчик – а, лампа Байярда–Альперта – б

Измерение давлений ниже 10^{-10} Торр с помощью лампы Байярда–Альперта невозможно из-за описанного влияния рентгеновского излучения и требует использования специальных приборов. К ним относятся, в частности, экстракторные вакуумметры, принцип действия которых основан на извлечении (экстракции) ионов, образованных в результате электронного удара, из зоны ионизации и влияния рентгеновского излучения. Благодаря специальной ионной оптике, поток ионов передается на коллектор, расположенный в зоне тени для рентгеновских лучей. Одна из возможных конструкций экстракторного вакуумметра была предложена Хелмером и Хайвардом и представлена на рис. 10. В этом датчике поток ионов отклоняется на 90° в цилиндрическом конденсаторе и попадает на коллектор ионов. Перед коллектором также расположена дополнительная сетка, подавляющая появление тока вторичных и фотоэлектронов с коллектора.

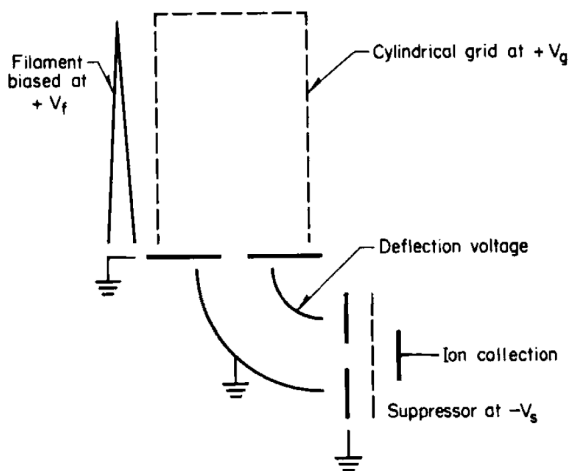


Рис. 10. Датчик экстракторного вакуумметра

Нижний предел измерений экстракторных вакуумметров составляет около 10^{-12} Торр. Однако стоимость таких приборов весьма высока, а изготовление и эксплуатация весьма трудоемка и требует высокой квалификации персонала, что препятствует их широкому применению.

Датчики с холодным катодом

К данному классу датчиков относятся приборы на основе ячейки Пеннинга и инверсно-магнетронные датчики.

Датчики Пеннинга могут иметь несколько различающуюся конструкцию, один из вариантов которой представлен на рис. 11. Анод в виде короткой трубки под потенциалом 2–3 кВ располагается между двумя заземленными круговыми катодами. Для увеличения длины пробега электронов и, следовательно, уменьшения давления, при котором возможен самостоятельный газовый разряд, применяется сильное магнитное поле $\sim 0,1$ Тл, направленное вдоль оси симметрии датчика. Датчик Пеннинга позволяет проводить измерения давления в диапазоне от 10^{-2} до 10^{-6} Торр. Однако при давлении ниже 10^{-5} Торр загорание разряда нестабильно. Вообще вакуумметр считается в большей мере индикатором давления и не подходит для прецизионных измерений. Тем не менее, благодаря своей простоте и надежности он находит применение во многих научных лабораториях и на производстве.

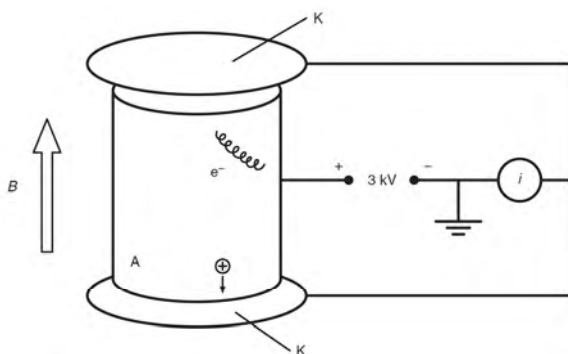


Рис. 11. Вакуумметр Пеннинга

Инверсно-магнетронный вакуумметр

Инверсно-магнетронный вакуумметр, схематически изображенный на рис. 12, позволяет проводить измерение намного более низких давлений (до 10^{-10} Торр), чем это позволяет сделать вакуумметр Пеннинга. Датчик этого вакуумметра, обладающий цилиндрической симметрией, помещается в сильное продольное магнитное поле, направленное вдоль его оси. Центральный электрод **A** в виде стержня играет роль анода и находится под положительным потенциалом порядка нескольких киловольт. Электрод **C** в виде полого цилиндра находится под нулевым потенциалом и выступает в роли катода. Дополнительный электрод **G**, находящийся под потенциалом катода, предотвращает появление на катоде паразитного тока, вызванного автоэлектронной эмиссией, расположенного на оси. В описанной конфигурации заряженные частицы движутся в радиальном электрическом и аксиальном магнитном поле.

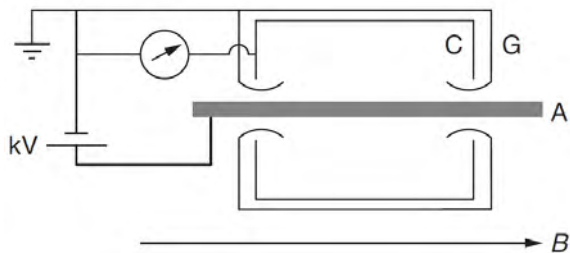


Рис. 12. Инверсно-магнетронный вакуумметр

Вакуумметры с холодным катодом имеют точность сравнимую с вакуумметрами с горячим катодом, но более надежны в эксплуатации благодаря отсутствию раскаленного катода, способного перегорать.

Основными недостатками датчиков с холодным катодом являются следующие:

- Высокая скорость откачки датчиком ($\sim 0,1-1$ л/с), что приводит к появлению разности давлений в датчике и вакуумной системе.
- При малых давлениях большое время установления тока (около 30 с при давлении 10^{-9} Торр).
- Наличие магнитного поля, способного влиять на электронные токи в вакууме.

Кроме этого, в силу различия в сечениях ионизации молекул различных газов, все датчики, принцип работы которых основан на ионизации молекул, выдают показания, зависящие от состава газа. Все ионизационные вакуумметры для проведения абсолютных измерений требуют проведения калибровки.

Вакуумметр с вращающимся ротором

Принцип действия данного прибора основан на зависимости вязкости газа от давления. Впервые конструкция такого вакуумметра была предложена в 1962 году. Устройство вакуумного датчика схематично представлено на рис. 13.

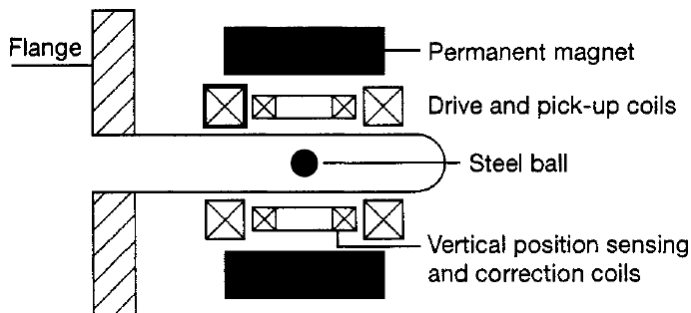


Рис. 13. Устройство датчика давления с вращающимся ротором

В качестве вращающегося ротора в нем выступает стальной шарик диаметром около 4,5 мм, подвешенный в магнитном поле в горизонтальной немагнитной трубе из нержавеющей стали, соединенной с вакуумной установкой. Для измерения давления шарик сначала раскручивается вращающимся магнитным полем до частоты ~ 400 Гц, после чего оно отключается. Скорость вращения шарика, регистрируемая катушками по частоте переменного магнитного поля шарика, постепенно снижается из-за сил трения между поверхностью шарика и газом. Давление газа вычисляется контроллером на основании следующей формулы:

$$p = \frac{\rho d}{10\sigma} \sqrt{\frac{2\pi RT}{M} \left(-\frac{\omega'}{\omega} \right)} - p_0,$$

где ρ – плотность материала шарика, σ – коэффициент эффективности передачи импульса молекулам газа от поверхности шарика, ω – угловая скорость шарика, ω' – его угловое ускорение, R – универсальная газовая постоянная, T – температура газа, M – молярная масса газа, p_0 – член, учитывающий ненулевое ускорение шарика при нулевом давлении газа.

На настоящий момент вакуумметры с вращающимся ротором являются наиболее высокоточными и стабильными приборами для измерения давлений в диапазоне от 10^{-1} до 10^{-7} Торр. Их датчики химически инертны, отсутствует откачной эффект и эффект газовой выделенности. Недостатками является высокая чувствительность к вибрациям, зависимость показаний от молекулярной массы газа, высокая стоимость.

Методы калибровки вакуумметров

Как было отмечено выше, большинство типов вакуумметров для определения давления в абсолютных единицах требует проведения процедуры их калибровки.

Для давлений от атмосферного до 0,1 Торр применяется метод сравнения показаний калибруемого вакуумметра и эталонного вакуумметра, в качестве которого выступают, как правило, жидкостные вакуумметры.

При давлениях до 10^{-6} Торр применяется метод сравнения показаний калибруемого вакуумметра и уже откалиброванного вакуумметра (вторичного эталона с высокой точностью и воспроизводимостью показаний). В качестве такого эталона могут выступать емкостные вакуумметры или вакуумметры с вращающимся ротором.

Градуировка вакуумметров при давлениях ниже 10^{-6} Торр проводится обычно с использованием специальных поверочных установок, позволяющих создать в вакуумной камере известное давление газа. На практике применяются статический и динамический вариант генерации заданного давления.

Статический вариант применяется для создания заданного давления в диапазоне от 10 до 10^{-7} Торр. Суть метода заключается в использовании закона Бойля–Мариотта для определения конечного давления после нескольких последовательных процедур выпуска газа с известным начальным давлением

при известных соотношениях объемов. Схема установки, в которой реализован данный подход, изображена на рис.14.

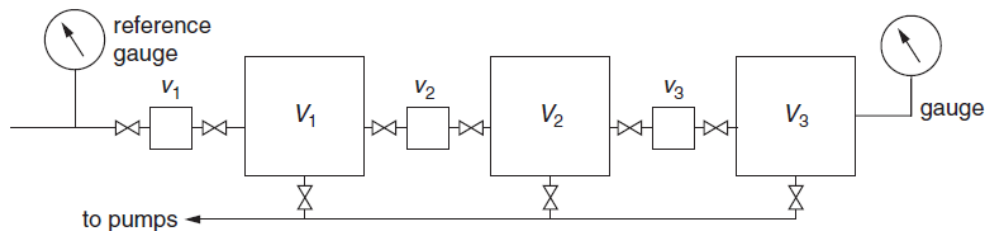


Рис. 14. Схема установки для калибровки статическим методом.

Исходно все объемы $v_1, V_1, v_2, V_2, v_3, V_3$ (предварительно измеренные) должны быть откачаны с помощью насоса до давления намного ниже предела измерений калибруемого вакуумметра. Затем объем v_1 заполняется газом с известным давлением, определяемым по эталонному вакуумметру и изолируется от линии напуска. Далее v_1 соединяется с объемами V_1, v_2 , после чего v_2 изолируются. Аналогичная процедура повторяется еще два раза, в результате чего в объеме V_3 создается известное давление p_3 :

$$p_3 = p_1 \frac{v_1}{v_1 + V_1 + v_2} \frac{v_2}{v_2 + V_2 + v_3} \frac{v_3}{v_3 + V_3}.$$

Однако данный метод больше подходит для калибровки с использованием инертных или химически неактивных газов (азот, аргон и др.). Калибровка по химически активным газам, таким как кислород, представляет определенные сложности из-за возможных реакций на поверхности вакуумной камеры.

Для генерации давлений от 10^{-6} до 10^{-10} Торр применяется динамический метод. Схема установки, используемой для калибровки этим методом, представлена на рис. 15.

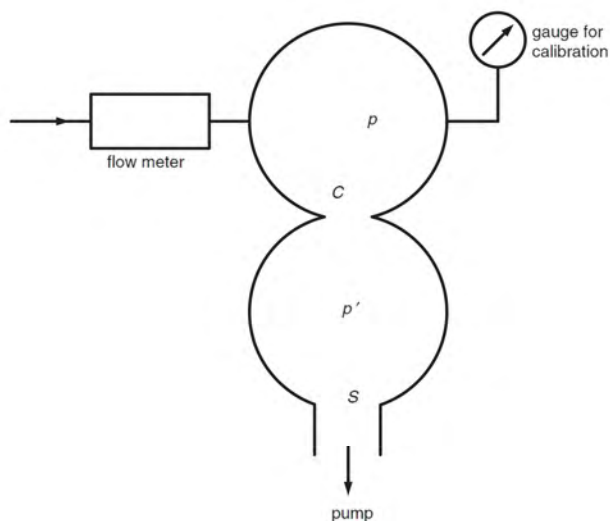


Рис. 15. Схема установки для калибровки динамическим методом

Она состоит из двух сферических камер, соединенных круглым отверстием, одна из которых откачивается насосом со скоростью откачки S , а во вторую, соединенную с калибруемым датчиком, подается газ с заданной величиной потока Q . В стационарном режиме величина Q может быть выражена через разницу давлений в камерах ($p-p'$) и проводимость отверстия C , либо через давление p' и скорость откачки S :

$$Q = C(p - p') = Sp'.$$

Тогда давление p в камере, соединенной с калибруемым прибором, равно

$$p = Q(1/C + 1/S).$$

При условии если скорость откачки намного превышает проводимость отверстия, вторым слагаемым в этом выражении можно пренебречь. Выражение для проводимости отверстия определяется площадью отверстия и формой камер и может быть получено из законов газовой динамики. В результате задача калибровки сводится к проблеме измерения входного потока газа Q . Устройство для определения потока может быть основано на измерении падения давления в закрытом объеме, либо уменьшения объема с постоянным давлением.

Заключение

В заключении приведем сводную таблицу с перечислением рассмотренных в обзоре вакуумметров, с диапазонами измеряемых давлений, основными достоинствами и недостатками, а также их ориентировочной стоимостью. Надеемся, она поможет вам сориентироваться при выборе прибора, наиболее подходящего для ваших целей.

Т а б л и ц а 2

Характеристики различных типов вакуумметров

Вид датчика	Изменяемые давления, Торр	Точность %	Цена, руб	Достоинства	Недостатки
Жидкостной	$10^3 - 1$	5–10	<2500	Простота, абсолютные показания	Возможное загрязнение вакуума парами
Мак Леода	$10^3 - 5 \cdot 10^{-6}$	5–10	10000–20000	Широкий диапазон измеряемых давлений, использовался для калибровки	Невозможность непрерывных измерений и измерения давления паров легко конденсируемых жидкостей
Трубка Бурдона	$10^3 - 1$	10	<2500	Простота и надежность	Высокая погрешность ниже 1 мбар
Диафрагменный	$10^3 - 10^{-1}$	10	2500–10000	Датчик общего назначения	Заметный дрейф нуля

Окончание табл. 2

Термопарный	10^{-10} – 10^{-3}	20	2500–10000	Простой, надежный, недорогой	Инерционность, зависимость показаний от сорта газа
Пирани	10^3 – 10^{-3}	10	10000–20000	надежность	Дрейф нуля при загрязнении. Зависимость показаний от сорта газа
Традиционный ИВ	1 – 10^{-7}	10–30	20000–30000	Чувствительность, линейная шкала	Горячий катод, зависимость показаний от сорта газа
Байярда-Альперта	10^{-2} – 10^{-10}	10–30	20000–30000	–/– + более низкие измеряемые давления	–/–
Ёмкостной	10^3 – 10^{-4}	<5	50k–200k	Высокая точность, независимость показаний от сорта газа	Непригоден для измерения сверхвысокого вакуума
С вращающимся ротором	10^{-1} – 10^{-7}	1-2	350k–500k	Высокая точность и стабильность. Не нарушает вакуумных условий	Высокая стоимость, малая частота измерений, зависимость показаний от сорта газа

Список литературы

1. Chambers A. Modern vacuum physics, CRC Press Company, 2005.
2. Yoshimura N. Vacuum Technology, Springer, 2008.
3. Chambers A., Fitch R. K., Halliday B. S. Basic Vacuum Technology, Institute of Physics Publishing, 1998.
4. Ашкинази Л. А. Вакуум для науки и техники, Библиотечка «Квант». М.: Наука, 1987. Вып. 58.