

Владимирский государственный университет

В. Н. ЛОБКО

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ
И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ
И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПРОЦЕССОВ**

Средства измерения вакуума

Учебное пособие



Владимир 2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

В. Н. ЛОБКО

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ
И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Средства измерения вакуума

Учебное пособие

Электронное издание



Владимир 2024

ISBN 978-5-9984-2035-1

© Лобко В. Н., 2024

УДК 536.5

ББК 35.10

Рецензенты:

Доктор технических наук, профессор
зав. кафедрой химической технологии
Владимирского государственного университета
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Ю. Т. Панов

Председатель правления
ООО «НПП "Макромер" имени В. С. Лебедева»
А. О. Стюнина

Лобко, В. Н.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ХИМИЧЕСКИХ И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ. Средства измерения вакуума [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. Н. Лобко ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2024. – 203 с. – ISBN 978-5-9984-2035-1. – Электрон. дан. (26,8 Мб). – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM). – Систем. требования: Intel от 1,3 ГГц ; Windows XP/7/8/10 ; Adobe Reader ; дисковод CD-ROM. – Загл. с титул. экрана.

Учебное пособие посвящено рассмотрению прикладных аспектов и практической реализации такого важнейшего для химии и химической технологии понятия, как вакуум. Рассмотрены теория вакуумметрии и вакуумметры прямого действия (жидкостные, деформационные), косвенных измерений (теплоэлектрические, ионизационные и магнитные) и средства измерения газовых потоков в вакууме.

Предназначено для студентов вузов химических и химико-технологических направлений подготовки 04.03.01, 04.04.01 – Химия, 18.03.01 – Химическая технология.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Табл. 17. Ил. 180. Библиогр.: 42 назв.

ISBN 978-5-9984-2035-1

© Лобко В. Н., 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

z0	Введение	5
z1	Глава 1. ИЗМЕРЕНИЕ ОБЩИХ ДАВЛЕНИЙ. ПРИБОРЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ	7
z2	§ 1. Классификация средств измерения вакуума	7
z3	§ 2. Жидкостные U-образные манометры	12
z4	§ 3. Жидкостные компрессионные вакуумметры	27
z5	§ 4. Деформационные трубчатые манометры	43
z6	§ 5. Деформационные сильфонные манометры	49
z7	§ 6. Деформационные мембранные манометры	54
z8	Глава 2. ТЕПЛОВЫЕ ВАКУУММЕТРЫ	69
z9	§ 1. Теоретические основы тепловой вакуумметрии	69
z10	§ 2. Термопарные вакуумметры	75
z11	§ 3. Теплоэлектрические вакуумметры сопротивления	89
z12	§ 4. Другие виды тепловых вакуумметров	109
z13	§ 5. Некоторые технические характеристики тепловых вакуумметров	112
z14	Глава 3. ИОНИЗАЦИОННЫЕ ВАКУУММЕТРЫ	115
z15	§ 1. Теоретические основы работы ионизационных вакуумметров	115
z16	§ 2. Вакуумметры прямопролётные и стержневого типа	119
z17	§ 3. Преобразователи с внешним цилиндрическим коллектором	123
z18	§ 4. Ионизационные вакуумметры с осевым коллектором	130
z18a	§ 5. Ионизационные вакуумметры специальных типов	137

z19	Глава 4. МАГНИТНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ И ДРУГИЕ ВАКУУММЕТРЫ	155
z20	§ 1. Общие сведения о магнитных электроразрядных вакуумметрах	155
z21	§ 2. Вакуумметры Пеннинга	157
z22	§ 3. Магнетронные вакуумметры	160
z23	§ 4. Инверсно-магнетронные вакуумметры	163
z24	§ 5. Специальные типы магнитных электроразрядных вакуумметров	168
z25	§ 6. Радиоизотопные вакуумметры	175
z26	§ 7. Вязкостные и радиометрические вакуумметры	177
z27	Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ	183
z28	§ 1. Введение	183
z29	§ 2. Магнитный статический газоанализатор	186
z30	§ 3. Панорамный газоанализатор	188
z31	§ 4. Циклотронный газоанализатор (омегатрон)	189
z32	§ 5. Времяпролётный газоанализатор	191
z33	§ 6. Электрический фильтр масс (квадрупольный)	194
z34	Заключение	197
z35	Вопросы для самопроверки	198
z36	Библиографический список	200

v0 ВВЕДЕНИЕ

Во многих отраслях химической промышленности, касающихся производства неорганических материалов, органического синтеза и многих других, используются вакуумные технологии. Вакуумные установки являются основными или вспомогательными частями большого числа технологических цепочек. Для успешной профессиональной деятельности специалисты-химики должны разбираться в вопросах, касающихся вакуумной техники как одной из высоких технологий, и, следовательно, – вакуумных измерений.

Вакуумные измерения охватывают вопросы непосредственного определения степени разреженности газов, а также специфических явлений, сопровождающих такое состояние газовой фазы. Практически это сводится к измерению абсолютных давлений, не только полных, но и в случае газовых смесей – парциальных, потоков газа в технологических установках, определению быстроты откачки вакуумных агрегатов, проверке герметичности (течеискания). Диапазон измерения вакуумметров начинается от атмосферных давлений и заканчивается областью высокого и сверхвысокого вакуума – 10^{-11} Па и ниже. Такой широкий диапазон не может быть охвачен приборами какого-то одного типа, поэтому применяются вакуумметры, действующие на самых разных принципах и имеющие свои поддиапазоны специализации. Особенность большинства вакуумных измерений – сравнительно низкая точность многих классов вакуумметров – до нескольких десятков процентов.

Особую важность имеют средства градуировки и поверки вакуумметров. Разработка средств измерения высокого и сверхвысокого вакуума – сложнейшие задачи – научная и технологическая, а градуировка соответствующих приборов по своей сложности едва ли не выше. Объясняется это практическим отсутствием абсолютных средств измерения давления в этой области.

Данное учебное пособие является второй частью описания вакуумной техники и рассматривает теоретические основы вакуумметрии, устройство и работу основных классов вакуумметров.

Следует особо подчеркнуть, что издание **не предназначено** для профессиональных вакуумщиков, в нём освещены указанные вопросы лишь в объёме, необходимом для специалистов – химиков и химико-технологов. В пособии не рассматриваются вопросы расчёта и конструирования средств измерения вакуума, их метрологической проверки и установления погрешностей приборов. В прикладном аспекте упор сделан только на разъяснение устройства и принципа действия вакуумметров, их преимуществ и недостатков. Профессионализм будущих химиков во многом будет формироваться полученными знаниями о работе вакуумных систем, применяемых на производстве и в научной области.

Внутренние гиперссылки позволяют перейти из оглавления к конкретному параграфу или главе («z№»). Для возврата в оглавление используются ссылки «v№».

v1 Глава 1. ИЗМЕРЕНИЕ ОБЩИХ ДАВЛЕНИЙ. ПРИБОРЫ ПРЯМОГО ДЕЙСТВИЯ

v2 § 1. Классификация средств измерения вакуума

Диапазон давлений, который используется в современной промышленности, технике и науке, очень широк, и простирается от сверхвысоких давлений и до сверхвысокого вакуума. Область, охватывающая разрежения и вакуум, то есть относящаяся к вакуумной технике, составляет $10^5 \div 10^{-12} \text{ Па}$. Разумеется, в таких широких диапазонах не может применяться какой-то один прибор, или несколько разнодиапазонных приборов, работающих на одном принципе. Особенно это касается измерений вакуумных.

Обычно приборы, работающие в области нормальных и повышенных давлений, называются **манометрами**, а приборы, измеряющие разрежение и вакуум, – **вакуумметрами** и (реже) – манометрами (манометр Мак-Леода, тепловой манометр, манометр Байярда-Альперта и т. д.). Иногда приборы одного типа могут использоваться и для измерений вакуума, и для измерения повышенного давления – например, U-образный манометр, манометр Бурдона.

Вакуумные системы, как правило, состоят из нескольких вакуумных камер, соединённых друг с другом вакуумпроводами (чаще всего трубчатыми), диафрагмами с отверстиями, коммутирующими устройствами (вакуумными кранами и вентилями), проницаемыми и полупроницаемыми перегородками, и откачного агрегата, содержащего один или несколько вакуумных насосов и вспомогательных устройств. В подавляющем большинстве случаев в состав вакуумных систем входят вакуумметры, которые представляют собой отдельные вакуумные камеры (рис. 1) или с помощью фланцевых соединений располагаются в одной из уже имеющихся камер («открытые» манометры). В случае закрытых манометров давление в измерительной камере s_i может несколько отличаться от давления p_i в вакуумной камере. Иногда это приходится учитывать в плане увеличения длительности измерений.

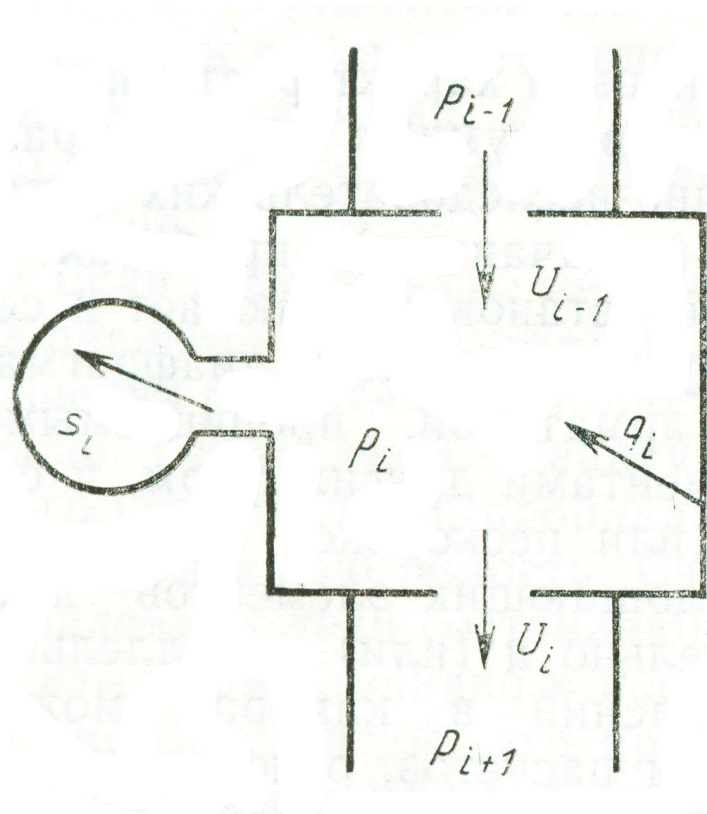


Рис. 1. Вакуумная система, состоящая из i -й и других вакуумных камер с давлениями $\dots, p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, \dots$; U_{i-1}, U_i – вакуумные проводимости по данному газу (размерность $U = [с/м]$); q_i – интегральный поток газа, поступающего в камеру или удаляющегося из неё за счёт натеканий, адсорбции и т.д. (источники и стоки); s_i – камера измерения вакуума [1, с. 8]

По характеру формируемого выходного сигнала вакуумметры подразделяются:

1) на **приборы прямого действия**, в которых газ, давление которого измеряется, непосредственно механически действует на **чувствительный элемент** вакуумметра, например – на столбик манометрической жидкости U-образного манометра. То есть показания этих приборов могут быть легко пересчитаны непосредственно в давление, причём эти показания не зависят от природы газа или его температуры. Поскольку измеряемые при этом силы очень малы, приборы прямого действия не измеряют давления ниже $10^{-2} \div 10^{-1} \text{ Па}$ (их диапазон составляет $10^5 \div 10^{-2} \text{ Па}$). Подавляющее большинство этих приборов не

имеют электрического выходного сигнала и не поддаются автоматизации измерений. По своей сути они являются **абсолютными приборами**, а с точки зрения метрологии – **первичными**. Очень часто они обладают высокой точностью измерений и служат в качестве **образцовых**. К вакуумметрам прямого действия относятся жидкостные, компрессионные и деформационные.

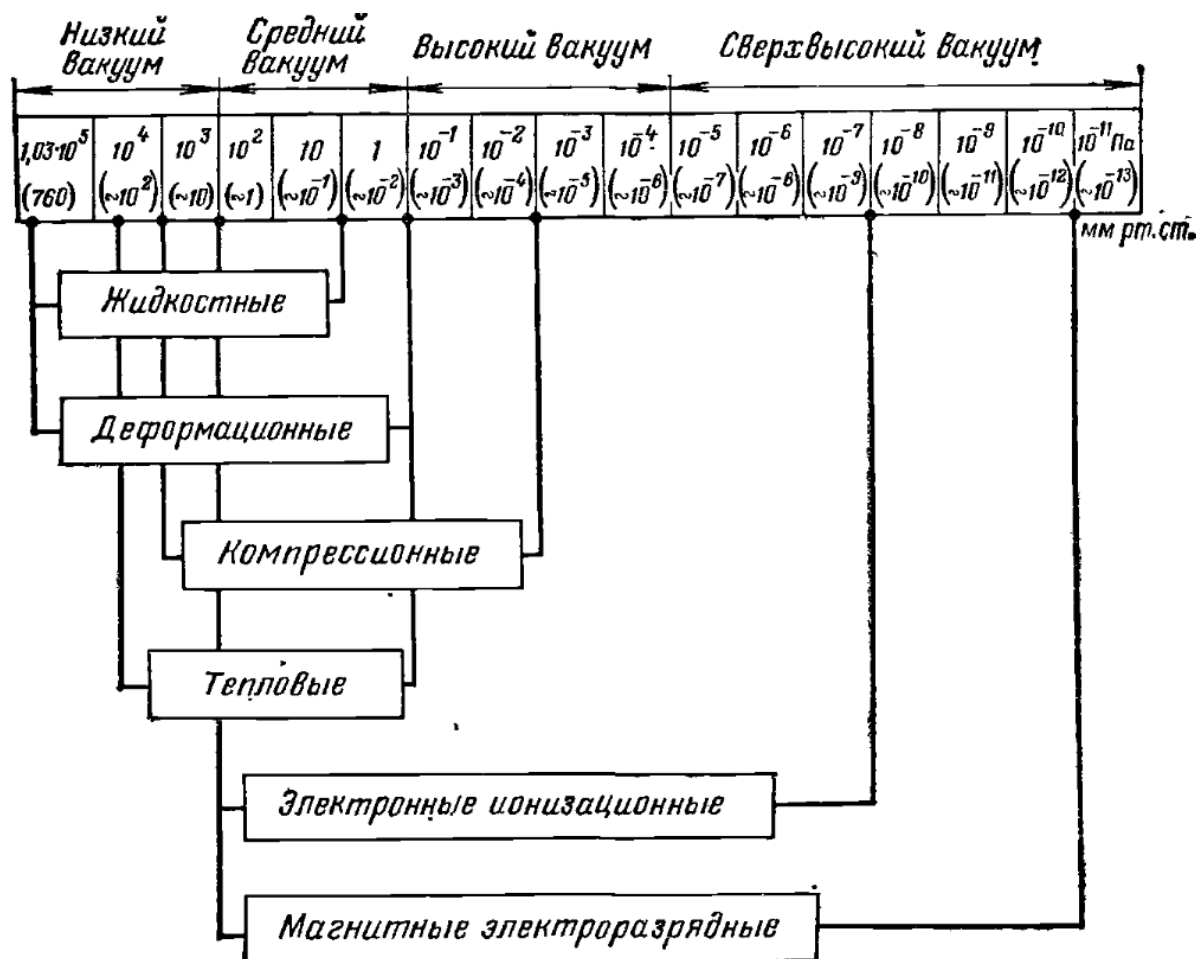


Рис. 2. Диапазоны измерений основных видов вакуумметров [2, с. 180]

2) **приборы косвенного действия**, в которых измеряемое давление газа меняет значение каких-то других параметров системы например – теплопроводности, вязкости, ионного тока, которые непосредственно и фиксируются этими приборами. Таким образом, они являются **неабсолютными** и **вторичными**, то есть, как правило, требуют градуировки по абсолютным приборам. Их показания зависят от состава газа и его температуры. Неоспоримым преимуществом приборов

косвенного действия является возможность получения электрического выходного сигнала, и, как следствие, – лёгкость автоматизации измерений. В большинстве случаев эти приборы состоят из двух основных частей – чувствительного элемента, который называется **манометрическим** (или первичным) преобразователем, и **измерительного блока**, как правило, – электронного. Диапазон измерений простирается от 10^{-11} – 10^{-10} Па до 10^3 – 10^4 Па.

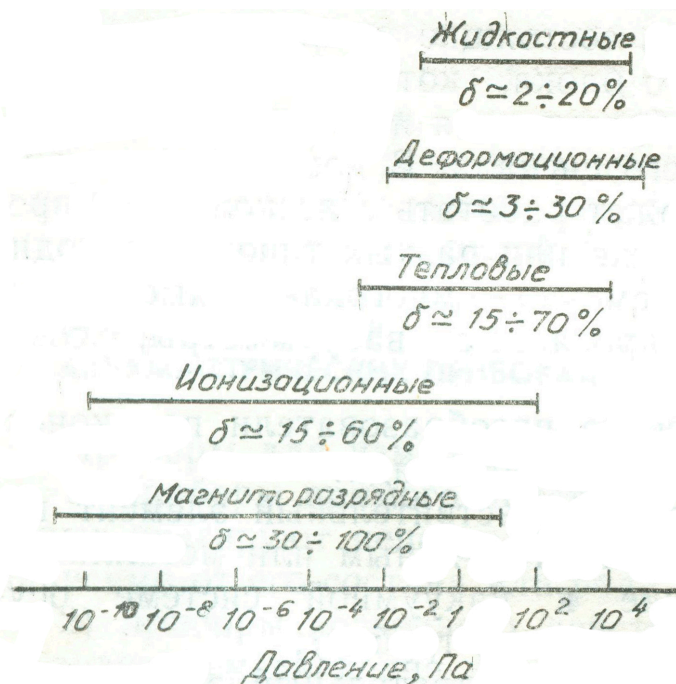


Рис. 3. Относительные погрешности основных видов вакуумметров [1, с. 12]

По принципу действия вакуумметры подразделяются:

- 1) на жидкостные;
 - 2) деформационные;
 - 3) тепловые (теплоэлектрические);
 - 4) ионизационные (электронные ионизационные);
 - 5) магниторазрядные (магнитные электроразрядные)
 - 6) деформационные электроразрядные;
 - 7) радиоизотопные ионизационные;
 - 8) вязкостные;
 - 9) радиометрические;
- и другие, редко используемые.

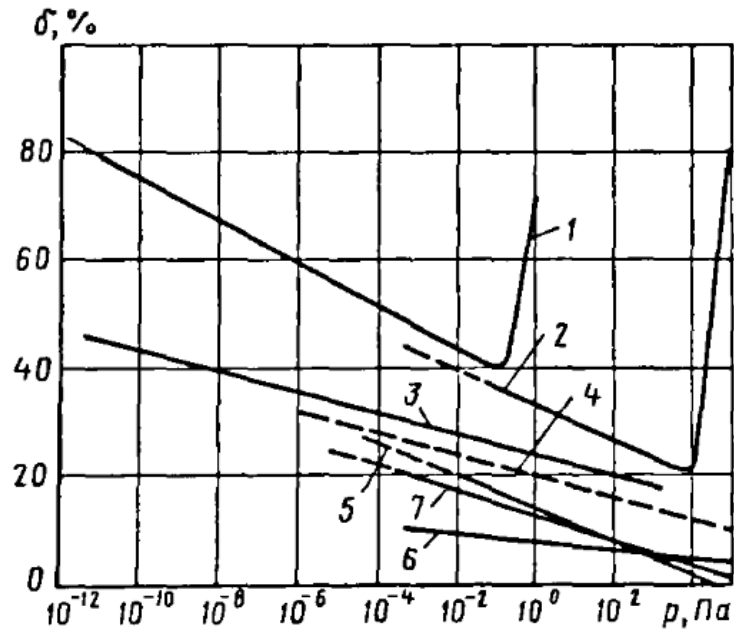


Рис. 4а. Погрешность и диапазоны измерений лабораторных (штриховые кривые) и промышленных (сплошные кривые) вакуумметров: 1, 3, 7 – ионизационных (1 – магнитных электроразрядных, 3 – электронных, 7 – радиоизотопных); 2 – тепловых; 4 – вязкостных; 5 – деформационных; 6 – жидкостных [9, с. 522]

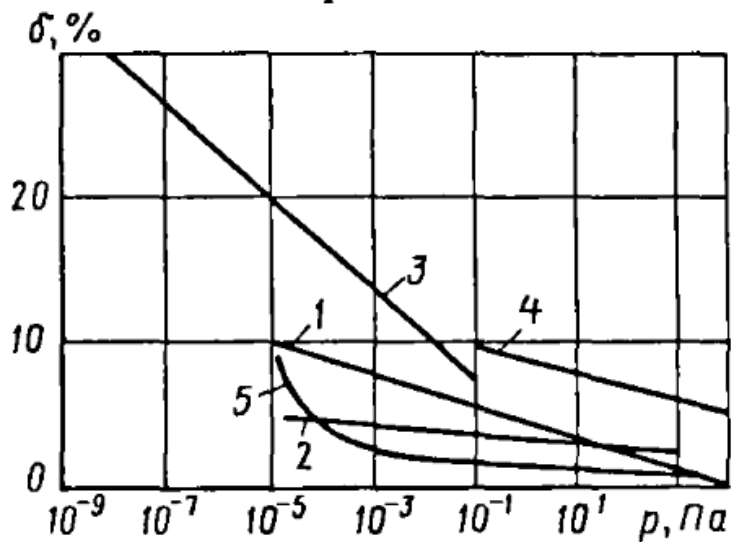


Рис. 4б. Погрешности и диапазоны измерения образцовых вакуумметров: 1 – мембранных; 2 – жидкостных (компрессионных); 3 – ионизационных электронных; 4 – тепловых; 5 – вязкостных [9, с. 523]

На рис. 2 представлены диапазоны измерений основных видов вакуумметров, а на рис. 3 – их приблизительные относительные погрешности. Погрешности измерений лабораторных и промышленных приборов в сравнении показаны на рис. 4а, а погрешности образцовых вакуумметров – на рис. 4б.

v3 § 2. Жидкостные U-образные манометры

В основе действия жидкостных манометров и вакуумметров лежит смещение уровней жидкости в сообщающихся сосудах под действием газов разного давления. Это смещение подчиняется законам гидростатики и определяет разность уровней жидкости в двух сообщающихся сосудах, которое и соотносится с измеряемым давлением (разрежением) газа. Таким образом, жидкостные манометры являются **дифференциальными** приборами.

Жидкостные вакуумметры подразделяются на **U-образные** и **компрессионные**.

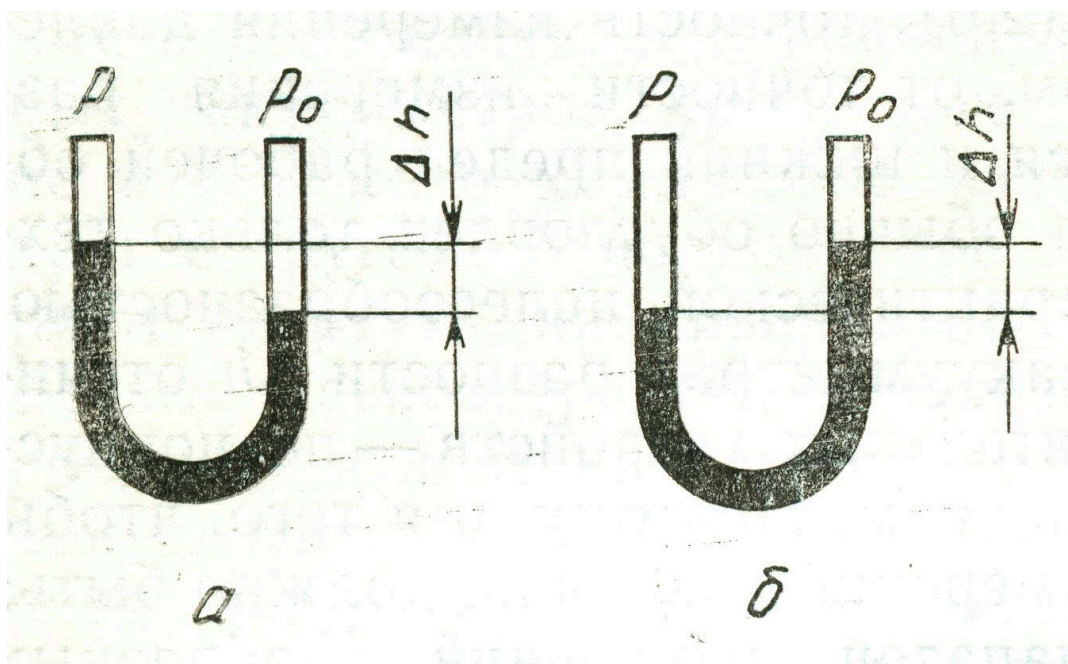


Рис. 5. Разность уровней жидкости Δh в U-образном манометре; а) – $p < p_0$, б) – $p > p_0$ [1, с. 21]

U-образные манометры представляют собой две стеклянные трубки одинаковой или различной формы, соединённые между собой (левое и правое колена манометра) и заполненные **манометрической жидкостью**. Над жидкостью в обоих коленах находится газ, одинакового или разного состава, под разным давлением ((рис. 5). В этом случае, в состоянии равновесия, разность уровней жидкости можно однозначно соотнести с разностью давлений газа в двух коленах.

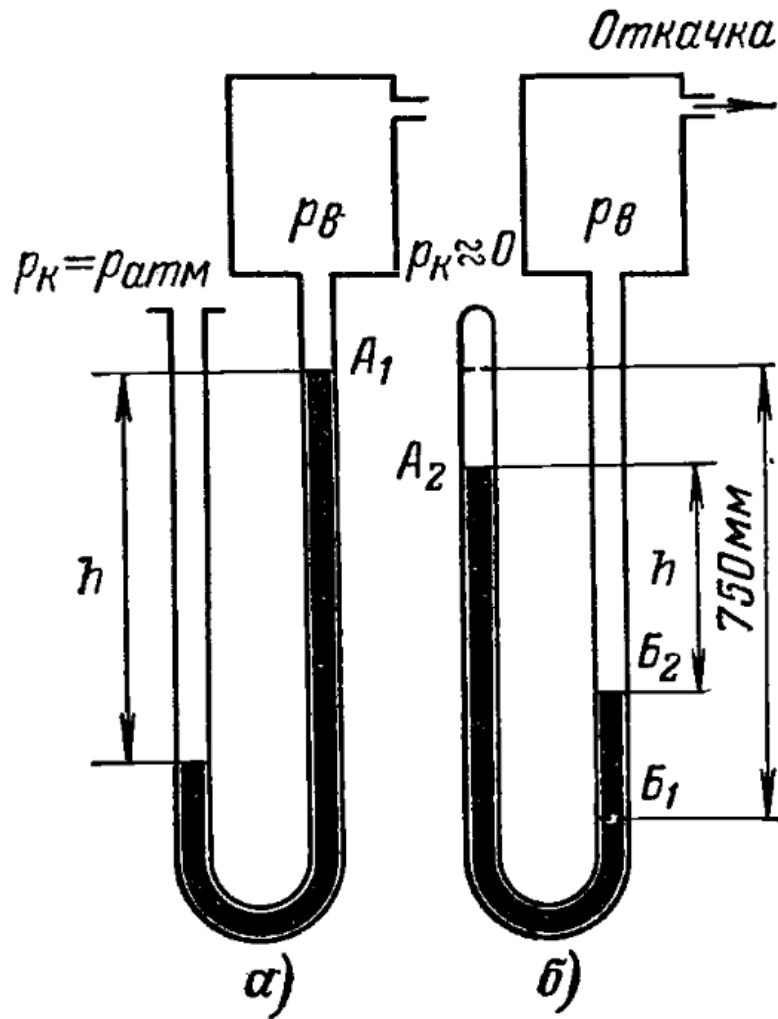


Рис. 6. U-образные манометры: а) – с открытым коленом; б) – с закрытым коленом. h столбик жидкости; p_k – давление сравнения; $p_{атм}$ – атмосферное давление; $p_в$ – давление в вакуумной камере (измеряемое) [2, с. 182]

$$|\Delta p| = \rho g \Delta h, \tag{1}$$

где Δp – разность давлений в коленях манометра, ρ – плотность манометрической жидкости, g – ускорение свободного падения в месте измерения, Δh – разность уровней жидкости («столбик» жидкости).

Необходимость измерения уровней жидкости, визуально или оптическими методами, диктует выбор материала трубок – прозрачное стекло постоянной толщины, не дающее оптических искажений.

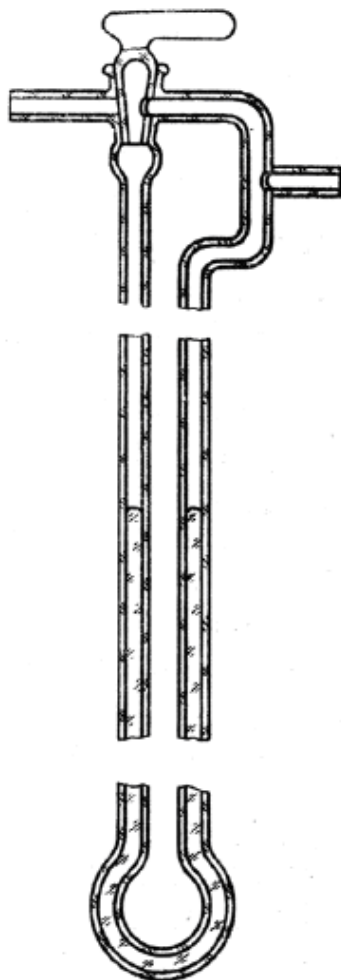


Рис. 7. Вариант U-образного манометра с вакуумной откачкой колена сравнения [3, с. 110]

Описанный манометр называется **манометром с открытым коленом** (рис. 6а). Как вариант, в одном из колен манометра может быть вакуум, тогда он превращается из дифференциального в **абсолютный** и называется **манометром с закрытым коленом** (рис. 6б). Колено под

вакуумом может быть запаянным или – находиться под постоянной откачкой. В первом случае вакуум получается при заливании манометрической жидкости в перевёрнутое запаянным концом вниз колено с последующим переворачиванием всего манометра на 180 градусов. При этом часть жидкости переходит во второе колено, а в верхней части запаянной трубки образуется вакуум («торричеллиева пустота»).

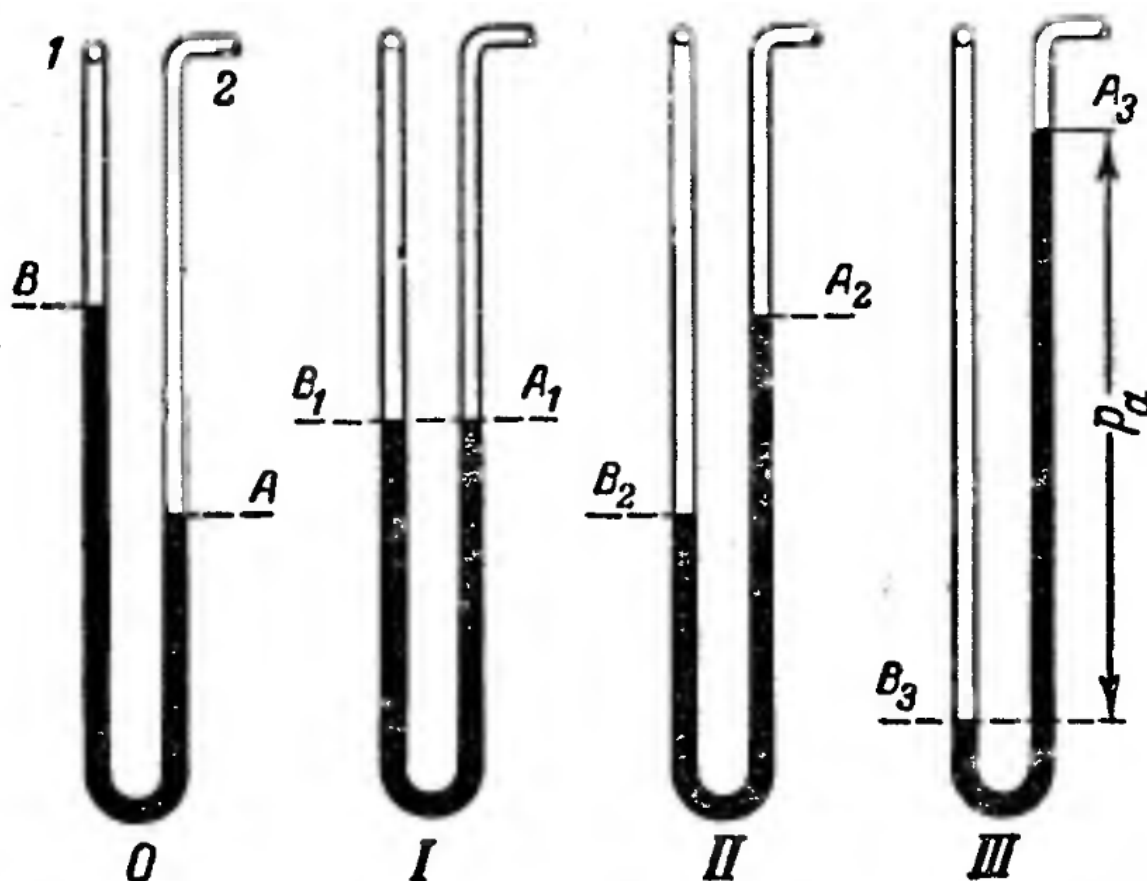


Рис. 8. Открытый U-образный ртутный манометр. 1 – открытое колено; 2 – трубка для присоединения к вакуумной системе. Положения уровней ртути: I – до начала откачки; II – в один из моментов откачки; III – по окончании откачки; 0 – при измерении давления, превышающего атмосферное [4, с. 198]

Один из вариантов манометра с постоянной откачкой (второй случай) показан на рис. 7. Сначала вакуумный кран повёрнут «глазком» направо (как показано на рисунке) и производится откачка из

обоих колен. Затем кран поворачивается налево, на вакуумную систему, и колена отсекаются друг от друга. Откачка правого колена может быть постоянной или периодической.

На рис. 8 показана работа открытого U-образного ртутного манометра. Левое колено открыто на атмосферу, правое – присоединено к вакуумной системе. После откачки манометр показывает разницу между атмосферным давлением и вакуумом в системе p_a . Если вакуум достаточно глубокий, p_a практически равно атмосферному.

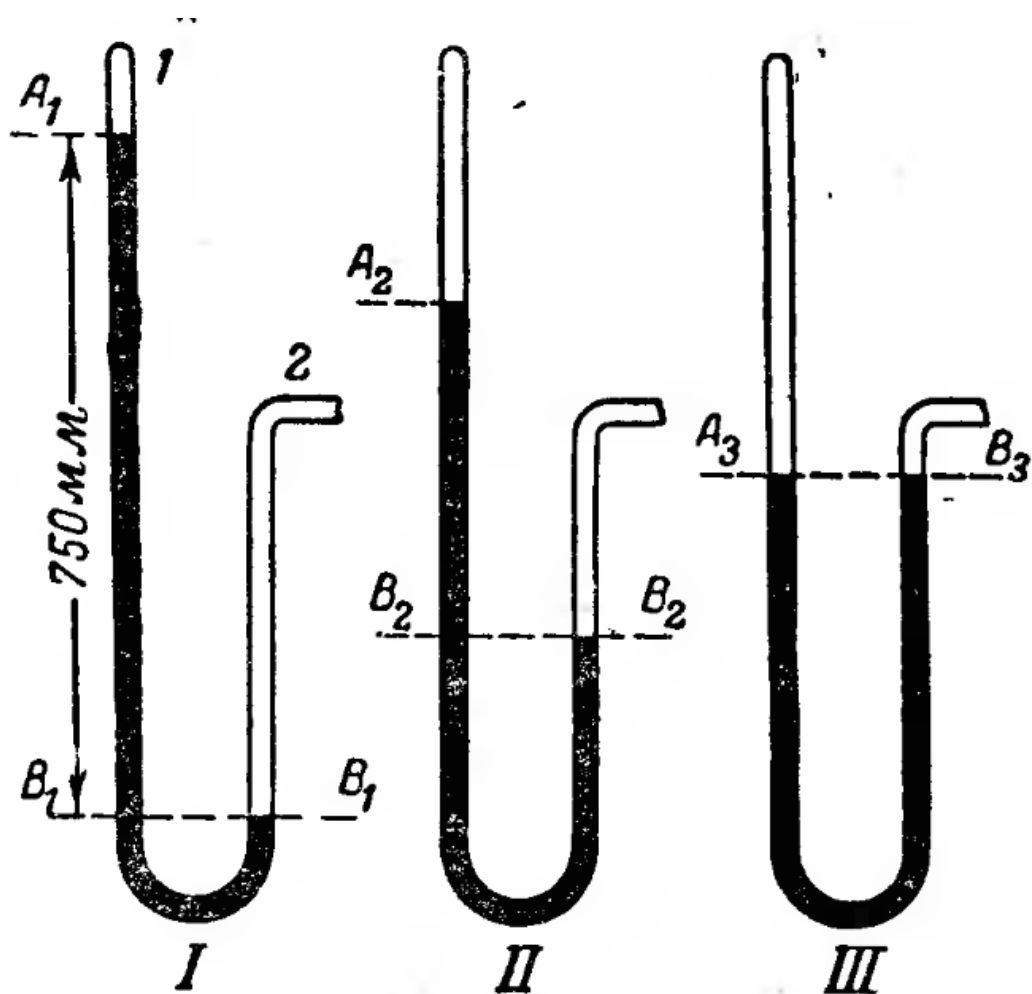


Рис. 9. Закрытый U-образный ртутный манометр. 1 – закрытое колено; 2 – трубка для присоединения к вакуумной системе. Положения уровней ртути: I – до начала откачки; II – в один из моментов откачки; III – по окончании откачки [4, с. 197]

На рис. 9 показана работа закрытого U-образного ртутного манометра. Если в откачиваемой системе, которая соединена с правым коленом, первоначальное давление равно 750 Torr (то есть на 10 Torr ниже атмосферного), то в верхней части левого колена будет сохраняться торричеллиева пустота (положение I). После откачки до достаточно глубокого вакуума уровни в двух коленах станут одинаковыми (положение II).

Для измерения разрежений в уменьшенном по сравнению с атмосферным диапазоне применяются закрытые **укороченные U-образные ртутные манометры** – рис. 10. Отсчёт давления по такому манометру начинается, когда давление понизится до $A - B \text{ Torr}$, а до этого момента ртуть прижата к запаянному концу. Для предотвращения резкого удара ртути о запаянный конец левого колена, когда производится напуск воздуха после измерений, нижнюю часть манометра в изгибе делают меньшего диаметра.

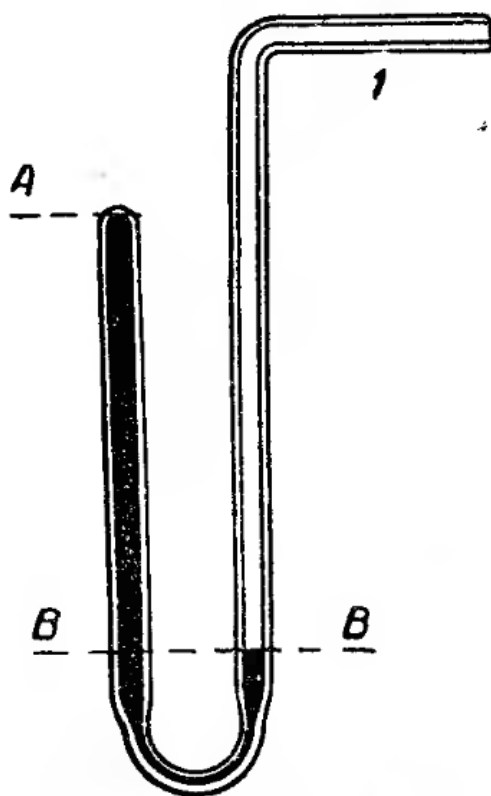


Рис. 10. Укороченный U-образный ртутный манометр. 1 – трубка для присоединения к вакуумной системе [4, с. 197]

Внутренний диаметр стеклянных трубок в измерительной части манометра должен быть не менее 7 мм и даже 10 мм для ртути и других манометрических жидкостей. При этом минимизируются погрешности, связанные с действием капиллярных сил и явления смачивания (мениск имеет достаточный горизонтальный участок).

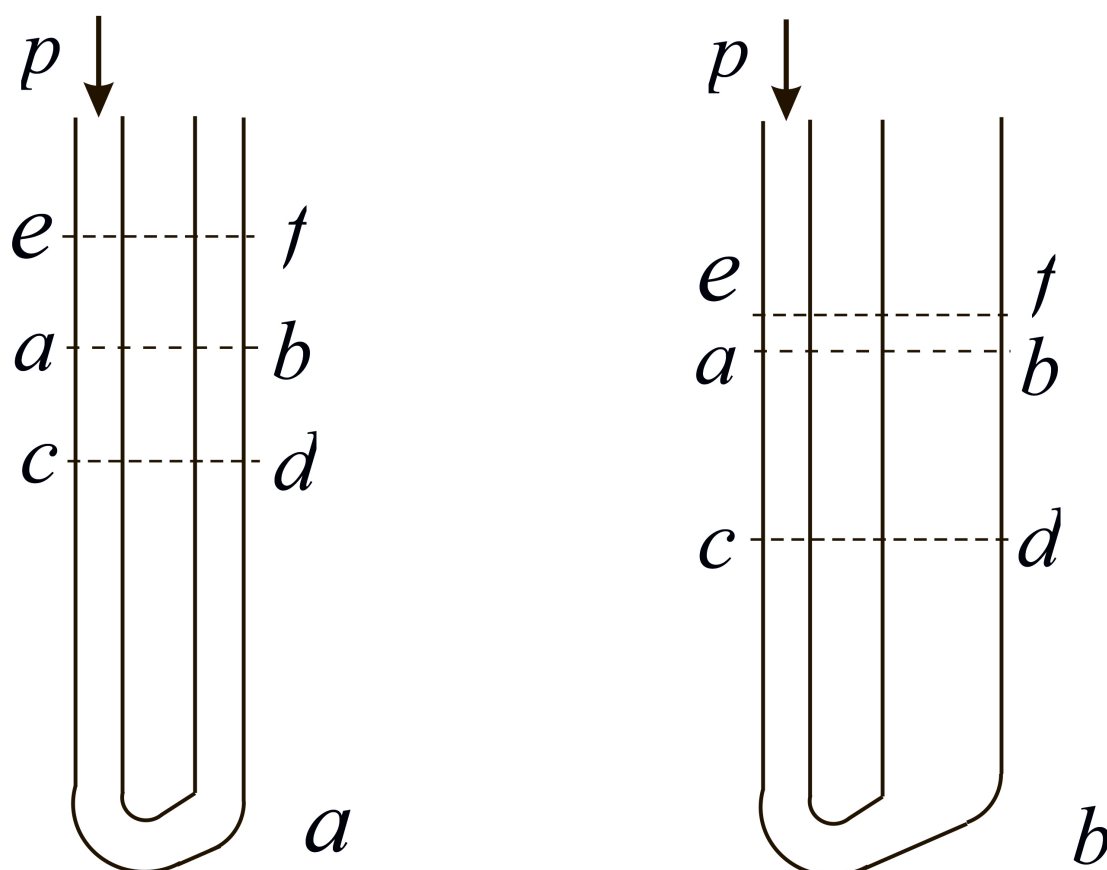


Рис. 11. Изменение уровней в U-образном манометре при действии избыточного давления p . а) – манометр с коленами одинакового диаметра; б) – манометр с коленами разного диаметра. $a - b$ – исходный уровень, при отсутствии разности давлений; $c - d$ – понижение уровня в левом колене; $e - f$ – повышение уровня в правом колене

Если внутренний диаметр трубок одинаков по всей высоте (рис. 11а), то при создании разности давлений уровни жидкости повышаются и понижаются на одно и то же расстояние от исходного нулевого уровня. Для колен разного диаметра изменение уровней будет разным

(рис. 11b). На этом рисунке показано изменение уровней, соответствующее конкретным разным диаметрам. Объём (а следовательно и масса) жидкости в столбике $a - c$ будет равен объёму жидкости в столбике $f - b$. При этом разность образовавшихся уровней в этих двух случаях будет одинаковой. Таким образом, **показания U-образного манометра не зависят от разнотолщинности колен.**

Последнее обстоятельство обуславливает существование специфических единиц измерения – **миллиметр ртутного столба** (мм. рт. ст. или Торр) и **метр водяного столба** (а также **миллиметр водяного столба**). В настоящее время эти единицы являются внесистемными, но их использование допускается без ограничений в частности, в вакуумной технике.

Принято, что **стандартное атмосферное давление** точно равно 760 мм рт.ст. или 101325 Па . Отсюда вытекает соотношение между

мм рт. ст. и паскалем: $1 \text{ мм рт.ст.} = \frac{101325}{760} \text{ Па} = 133,3224 \text{ Па}$, что од-

новременно является определением этой единицы (ранее было принято определение, что это давление, соответствующее столбику ртути 1 мм при плотности ртути $13\,595 \text{ кг/м}^3$ и ускорении свободного падения $9,80665 \text{ м/с}^2$; результаты этих определений совпадают с очень большой точностью). В вакуумной технике очень часто используют эту единицу измерения, так как она наглядно представляет «глубину» полученного вакуума или разрежения, то есть насколько мы как бы «отдалились от исходного состояния».

Метр водяного столба используют в технике (например, гидравлике) и в некоторых технологических процессах (химических и других), где требуются не очень точные измерения давлений.

Таким образом, в качестве **манометрических жидкостей** чаще всего используется **ртуть** и, в особых случаях, – **вода**; кроме этого, широко применяются **органические жидкости** (масла и другие).

При выборе манометрических жидкостей основными критериями являются **плотность, давление насыщенных паров, способность поглощать газы, вязкость**. Чем меньше плотность жидкости, тем бóльшей чувствительностью будет обладать вакуумметр. Малое давление насыщенных паров позволяет делать измерения при более высоком ва-

кууме. Большая газорастворимость приводит к необходимости дегазации и прогрева жидкости перед измерениями; газ может поглощаться манометрической жидкостью из вакуумной камеры прямо в процессе измерения. Слишком большая вязкость затрудняет процесс измерения уровней жидкости.

Таблица 1. Плотность и давление насыщенного пара рабочих жидкостей для жидкостных вакуумметров и потокомеров [1, с. 218, исправлено]

Рабочая жидкость	Плотность и давление насыщенного пара при 293К	
	$\rho \cdot 10^{-3}, \text{ кг / м}^3$	Па
Этиловый спирт	0,79	$7 \cdot 10^3$
Дистиллированная вода	1,00	$2,3 \cdot 10^3$
Ртуть Р-1	13,55	$1,6 \cdot 10^{-1}$
Минеральные масла*:		
ВМ-1; ВМ-2	0,87	$10^{-7} - 10^{-5}$
ВМ-4	–	$10^{-4} - 10^{-3}$
ВМ-5	0,87	$10^{-3} - 10^{-2}$
ВМ-6	–	$10^{-6} - 10^{-4}$
Кремнийорганические соединения*		
ПЭС-В-1 (ВКЖ-94А)	0,97	10^{-5}
ПЭС-В-2 (ВКЖ-94Б)	0,97	$10^{-6} - 10^{-4}$
ПФМС-1	1,00	$10^{-3} - 10^{-2}$
ПФМС-2/5 л	1,06	$10^{-6} - 10^{-4}$
ФМ-1	1,10	10^{-8}
Эфир 5Ф4Э	1,20	$1,3 \cdot 10^{-9}$

*Фракционная смесь.

(Дополнительно: при той же температуре плотность масла ВМ-3 850 кг / м^3 , дибутилфталата – 1046 кг / м^3).

Ртуть обладает самой большой плотностью из манометрических жидкостей (см. таблицу 1), но практически не растворяет газы и имеет довольно низкое значение давления насыщенного пара. Эти характеристики позволяют широко её использовать в различных областях вакуумметрии. Чаще всего она применяется в барометрах, в манометрах для измерения разрежения, низкого и среднего вакуума. Также она используется для измерения высокого вакуума (манометры Мак-Леода, см. ниже), но в этом случае требуются азотные ловушки, вымораживающие пары ртути и препятствующие их попаданию в вакуумную систему.

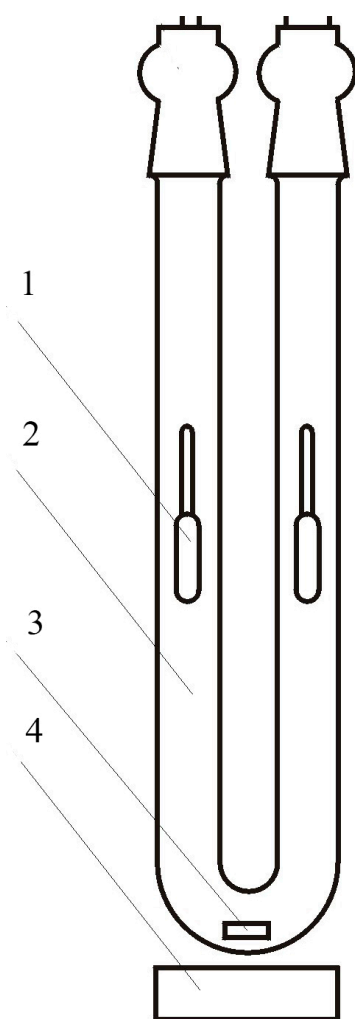


Рис. 12. Масляный U-образный манометр с экспресс-контролем плотности манометрической жидкости. 1 – ареометр; 2 – манометр с вакуумным маслом; 3 – магнитная мешалка; 4 – перемешивающее устройство [5, с. 117]



Рис. 13. Ареометры, погружённые в масляный U-образный манометр (см. рис. 8) [фото автора]

Вода, как манометрическая жидкость, имеет ограниченное применение, – в некоторых технологических процессах. У воды малая плотность, но очень высокое давление насыщенного пара и способность к газопоглощению. Водяные манометры могут использоваться для измерений небольших разрежений при давлениях, близких к атмосферному.

Минеральные и кремнийорганические масла имеют низкую плотность, часто – меньше, чем у воды, и крайне низкое давление насыщенных паров (см. таблицу 1). Плотность их меньше плотности ртути примерно в 15 раз. Всё это позволяет их применять в вакуумметрах для среднего и высокого вакуума. Пожалуй, единственный их серьёзный недостаток – очень высокое газопоглощение. Это требует их тщательной дегазации под вакуумом, с перемешиванием и желательно – с прогревом. При этом вначале наблюдается буквально вскипание масла, сам процесс дегазации, уже в «спокойном режиме», протекает длительно – несколько часов. Тем не менее полностью освободить масло от растворённых газов не удаётся. В работе [5, с. 117] предложен масляный манометр, в оба колена которого помещены оттарированные ареометры для экспресс-контроля плотности масла (рис. 12, 13). В манометре предусмотрено перемешивание масла с помощью магнитной мешалки, расположенной внизу манометра на изгибе трубок. Кроме этого, дополнительно на этапе дегазации масло можно перемешивать с помощью самих ареометров (внешним магнитом; дробь ареометра – железная). Поскольку остатки растворённого газа сильно удерживаются жидкостью даже под вакуумом, то они практически не будут загрязнять газовую фазу и могут влиять только на плотность самой жидкости (см. (1)). Таким образом, мы получаем достаточно прецизионную измерительную систему. Манометр использовался для градуировки теплового вакуумметра сопротивления (см. с. 101 – 107). Точность его составила приблизительно $\pm 0,003$ Торр.

В металлургии в качестве манометрической жидкости иногда используется борвольфрамовокислый кадмий, который практически не поглощает газы; его плотность примерно в 3,5 раза больше, чем у вакуумного масла. [4, с. 200]. Также в некоторых случаях применялись легкоплавкие металлы, но их использование очень сложно с технической точки зрения.

Для увеличения чувствительности и точности измерения часто используют **манометры с наклонным коленом** – рис. 14, которые позволяют сдвинуть нижний предел измерений до $0,1-1$ Па и даже до 10^{-2} Па. В самом деле, если происходит повышение горизонтального уровня жидкости от $a-b$ до $e-f$, то по оси наклонного колена жид-

кость пройдёт расстояние l , которое больше повышения уровня по вертикали. Отсчётная шкала (линейка) совмещается с наклонным коленом, измерения по ней делаются более точно, а результат пересчитывается на вертикаль по тригонометрическим соотношениям. Однако можно заметить, что если l больше вертикального понижения уровня в левом колене, то из последнего жидкости уйдёт меньше, чем её требуется для заполнения правого колена до уровня $e - f$. Это означает, что в реальности произойдёт смещение начального уровня

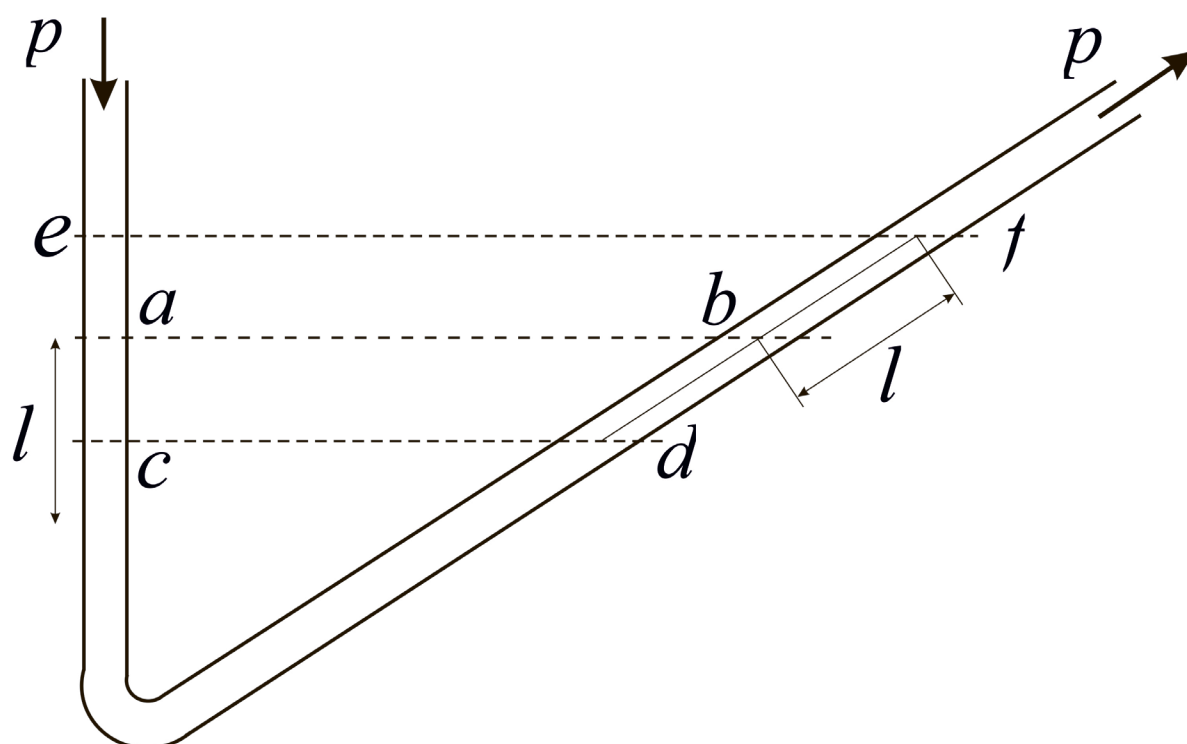


Рис. 14. Наклонный U-образный манометр; $a - b$ – исходный общий уровень жидкости в отсутствие действия давления; p – действие повышенного давления; $c - d$ – понижение уровня в левом колене в случае, если бы манометр был симметричным; $e - f$ – повышение уровня в правом колене при том же условии; l – столбик жидкости в наклонном колене, если бы её уровень поднялся бы до $e - f$, и сравнение его со столбиком понижения уровня в левом колене

$a - b$ вниз и, таким образом, уровень жидкости в обоих коленах после действия давления p будет ниже показанного на рисунке. Таким образом, отсчёт повышения уровня жидкости в наклонном колене от

начального $a - b$ будет некорректен. Требуется или расчёт перепада давления по более сложным формулам, или одновременный контроль уровня в левом колене. При этом теряется весь смысл такого усовершенствования. Выходом из этой ситуации мог бы стать симметричный манометр, в котором оба колена наклонены под одинаковым углом, но технически это осуществить трудно, в случае использования ртути манометр может расколоться, а габариты манометра могут быть слишком большими.

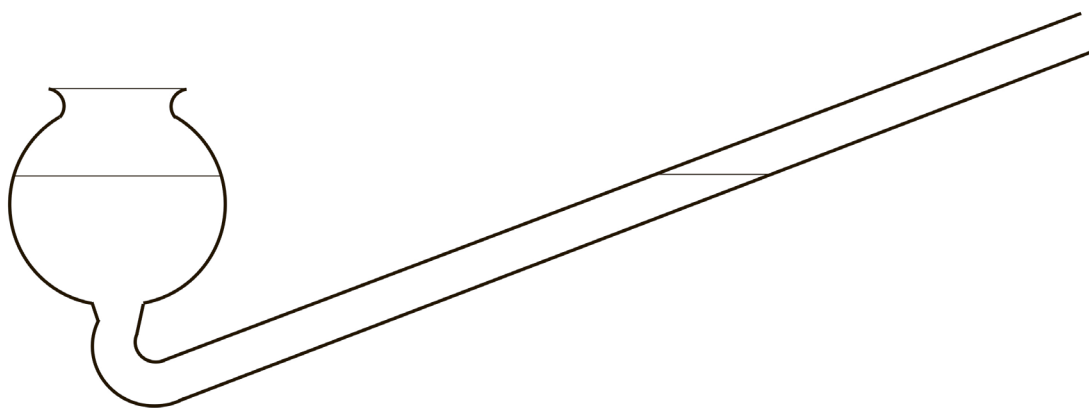


Рис. 15. Чашечный U-образный манометр

Развитием данной идеи, имеющим практическое значение, является **чашечный манометр** (рис. 15). Конструкция его аналогична манометру с коленами разного диаметра (рис. 11); диаметр чашки значительно больше диаметра наклонного колена, и можно считать, что нулевой уровень не смещается. Отсчёт производится только по наклонному колену. Чувствительность тем больше, чем больше угол наклона, но при слишком больших углах форма мениска становится «невнятной» (это хорошо видно на рис. 14) и затруднён точный отсчёт; в случае ртути, как манометрической жидкости, возможен её разрыв; повышенные требования предъявляются к одностолщинности трубки и её чистоте. Диаметр наклонного колена выбирается малым, не соответствующим требованию $> 7 \text{ мм}$ (см с. 18). Всё перечисленное делает применение таких манометров весьма ограниченным.

Таким образом, наиболее перспективным направлением повышения точности U-образных манометров является использование более

совершенных средств измерения уровня жидкости в коленах. В прецизионных измерениях от шкал и линеек давно уже перешли к оптическим средствам: катетометрам (подробное устройство и работа одного из катетометров разобрана в работе [6, с. 47 – 53]) и интерферометрам. В таблице 2 представлена точность измерения уровней различными способами.

Таблица 2. Точность измерения уровней манометрических жидкостей различными способами [7, с. 407]. a_h – абсолютная погрешность; p_{\min} – минимальное давление, измеряемое с погрешностью 10%

Способ отсчета уровня	a_h , мм	p_{\min} , Па	
		ртуть	масло ВМ-3
Линейкой	1,0	$1,3 \cdot 10^3$	83,0
Нониусным устройством	0,1	$1,3 \cdot 10^2$	8,3
штангенциркуля			
Катетометром	0,02	27,0	1,7
Интерференционный	10^{-5}	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$8,3 \cdot 10^{-4}$

Для ртути погрешность отсчёта уровней может составить 0,1 мм. Этот нижний предел ограничен непостоянством величины поверхностного натяжения, колебаниями плотности и вязкости, температурными градиентами и т. д.

Нижний предел измерения ртутных вакуумметров – $10^2 - 10^3$ Па, масляных – $10 - 10^2$ Па.

Таблица 3. Диапазон измеряемых давлений (в *гПа*) вакуумметров МВ [7, с. 407]

МВ 9,8	. . . . .	0 ... 9,8
МВ 15,68	. . . . .	0 ... 15,68
МВ 24,5	. . . . .	0 ... 24,5
МВ 39,2	. . . . .	0 ... 39,2
МВ 58,8	. . . . .	0 ... 58,8
МВ 98,0	. . . . .	0 ... 98,0

U-образные вакуумметры в силу своей хрупкости являются в основном лабораторными приборами, в промышленности они применяются реже. В таблице 3 приведены диапазоны измерений промышленных двухтрубных укороченных вакуумметров МВ с абсолютной погрешностью $\pm 0,196 \text{ гПа}$.

Следует также отметить, что существуют также двухжидкостные (две несмешивающиеся жидкости разной плотности) и поплавковые вакуумметры. Последние в основном используются для упрощения способа отсчёта уровня жидкости.

v4 § 3. Жидкостные компрессионные вакуумметры

Компрессионные манометры, или манометры Мак-Леода (по имени изобретателя; 1874 г.; правильная транскрипция – Мак-Лауд) являются высокоточными лабораторными приборами и служат для измерения среднего и высокого вакуума. Как и U-образные манометры, они **абсолютные**.

Принцип действия компрессионного манометра показан на рис. 16. Если мы имеем два сообщающиеся сосуда в виде U-образной стеклянной трубки, левое колено которой запаяно, а правое сообщается с вакуумной камерой, давление в обоих коленах будет одинаковым и равным давлению в камере (рис. 16а). В нижней части манометра, на изгибе, к нему припаяна вертикальная стеклянная трубка, заполненная ртутью, и сообщающаяся с резервуаром ртути. Уровень ртути в манометре может подниматься (соответствующие конструкции будут рассмотрены ниже).

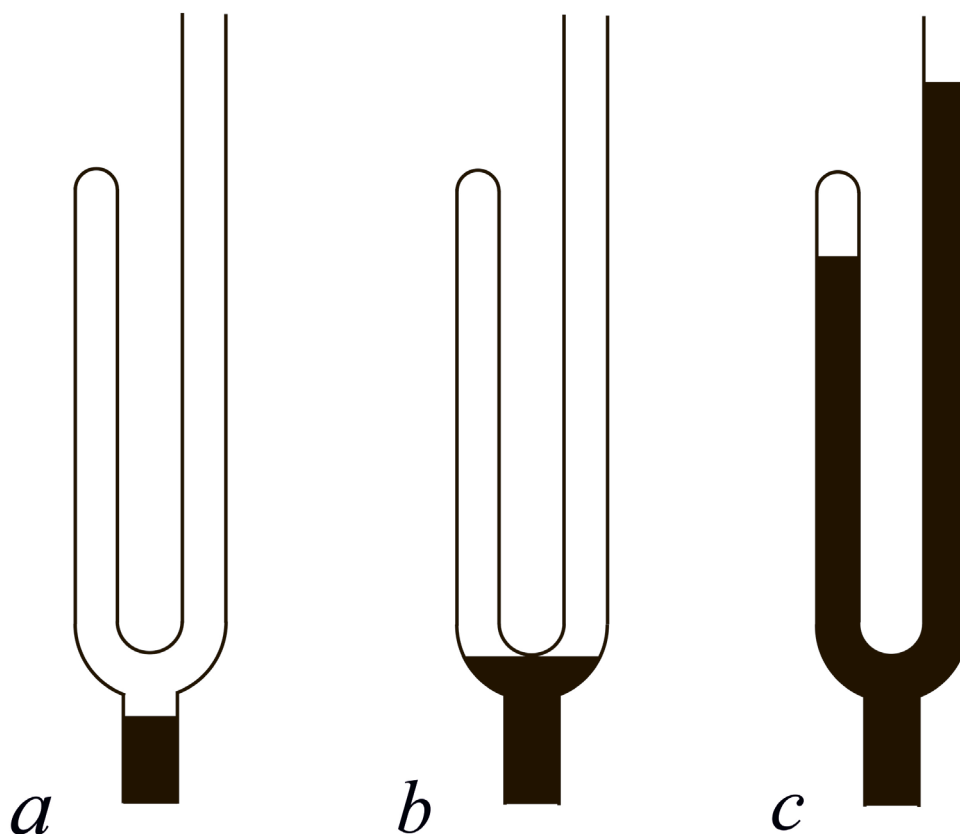


Рис. 16. Принцип действия компрессионного манометра. а – исходное состояние; давление в обоих коленах одинаковое; б – подъём ртути до отсечения объёмов правого и левого колен; давление в обоих коленах пока одинаковое; с – дальнейший подъём ртути; в запаянном колене газ сжимается, то есть его давление растёт; в правом колене, соединённом с вакуумной камерой, давление практически не меняется; образуется разность уровней

В исходном состоянии (рис. 16а) давление в обоих коленах одинаковое и равно давлению в вакуумной камере. По факту в этом состоянии мы имеем дело с U-образным манометром с закрытым коленом, пока без манометрической жидкости. При поднятии ртути (рис. 16б) происходит отсечение объёмов правого и левого колен; но давление в обоих коленах пока одинаковое. Дальнейший подъём ртути (рис. 16с) приводит к тому, что в запаянном колене газ сжимается, то есть его давление растёт, а в правом колене, соединённом с вакуумной камерой, давление практически не меняется. Таким образом, образуется раз-

ность уровней ртути в коленях, которая может быть измерена обычными методами. Если известен объём запаянного колена (рис. 16b) в момент отсечения и объём сжатого газа там же (рис. 16с), можно рассчитать давление в вакуумной камере (формулы приводятся ниже).

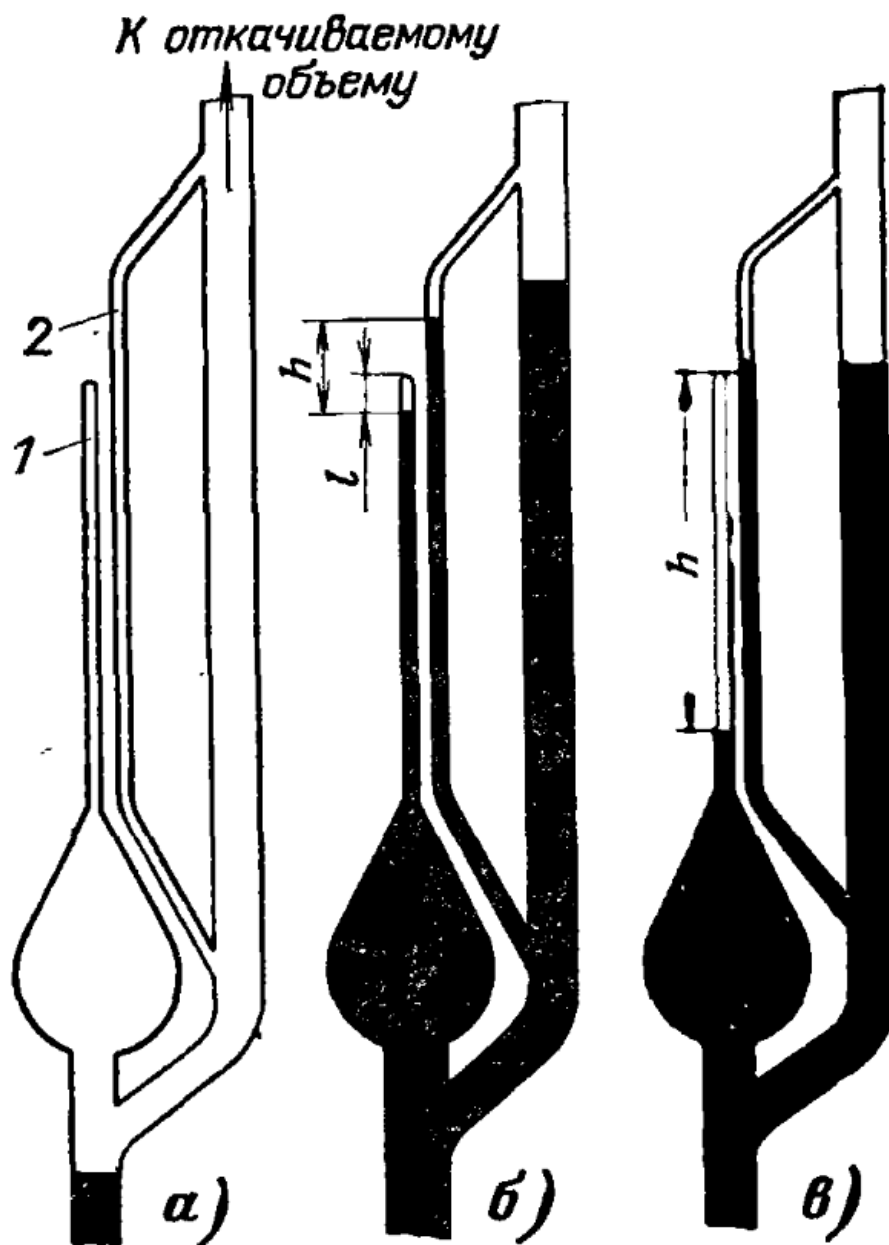


Рис. 17. Измерительная головка ртутного компрессионного манометра: а) – перед измерением; б) – измерение по методу линейной шкалы; в) – измерение по методу квадратичной шкалы (методы измерения рассмотрены ниже). 1 – измерительный (запаянный) капилляр; 2 – капилляр правого колена (сравнительный) [8, с. 187]

Классическая конструкция компрессионного манометра показана на рис. 17. Поскольку при измерении высокого вакуума объём сжатого (сжатого) газа может быть маленьким, запаянное колено (см. рис. 16) делают в виде сравнительно большой колбы с отходящим вверх капилляром (**измерительный капилляр**) – рис. 17, 1. Уровень ртути в капилляре – измеряемая величина. Капилляр должен быть постоянного внутреннего сечения и располагаться строго вертикально. Правое колено манометра (см. рис. 16), соединённое с вакуумной камерой, раздваивается на основное колено и **сравнительный капилляр** (рис. 17, 2), который подходит вплотную к запаянному капилляру. Оба капилляра должны быть одинаковыми по внутреннему диаметру и строго параллельны. Часто внутренняя поверхность этих калиброванных капилляров шлифуется или полируется. Эти меры принимаются для того, чтобы иметь одинаковые капиллярные эффекты, которые в совокупности не сказывались бы на результатах измерений. Уровень ртути в сравнительном капилляре всегда меньше, чем в правом колене (ртуть не смачивает стекло) из-за капиллярной депрессии (рис. 17б). Последняя одинакова в запаянном и сравнительном капиллярах, поэтому измеряемая величина давления будет корректна. (Методы измерений – рис. 17б, в, – будут рассмотрены ниже).

Конкретные размеры колбы и двух капилляров подбираются в зависимости от величины измеряемого вакуума. В качестве **манометрической жидкости** всегда используется только **ртуть**; другие жидкости, например, вакуумное масло, показали свою неэффективность.

Этапы измерения вакуума манометром Мак-Леода показаны на рис. 18. Здесь представлен самый простой, наглядный, но далеко не самый лучший метод подъёма ртути, – по принципу сообщающихся сосудов. Груша 6 достаточного объёма, открытая на атмосферу и заполненная ртутью, соединена гибким резиновым шлангом 7 с трубкой манометра 3. При поднятии груши вверх уровень ртути в манометре повышается, при опускании – понижается. Длина трубки 3 до измерительной части манометра должна соответствовать столбику ртути атмосферного давления – примерно 760 мм.

В исходном состоянии (рис. 18-Г) вакуумная камера не откачана, внутри неё и в самом манометре давление – атмосферное. Уровень ртути в груше 6 и трубке 3 одинаков.

Затем в вакуумной камере (объем её должен быть значительно больше объема манометра) производится откачка до вакуума, значение которого надо измерить (рис. 18-II). При этом ртуть в трубке 3 поднимется до уровня атмосферного столбика – например. до 750 мм. Этот уровень должен быть ниже измерительной части манометра, то есть – не доходить до разветвления.

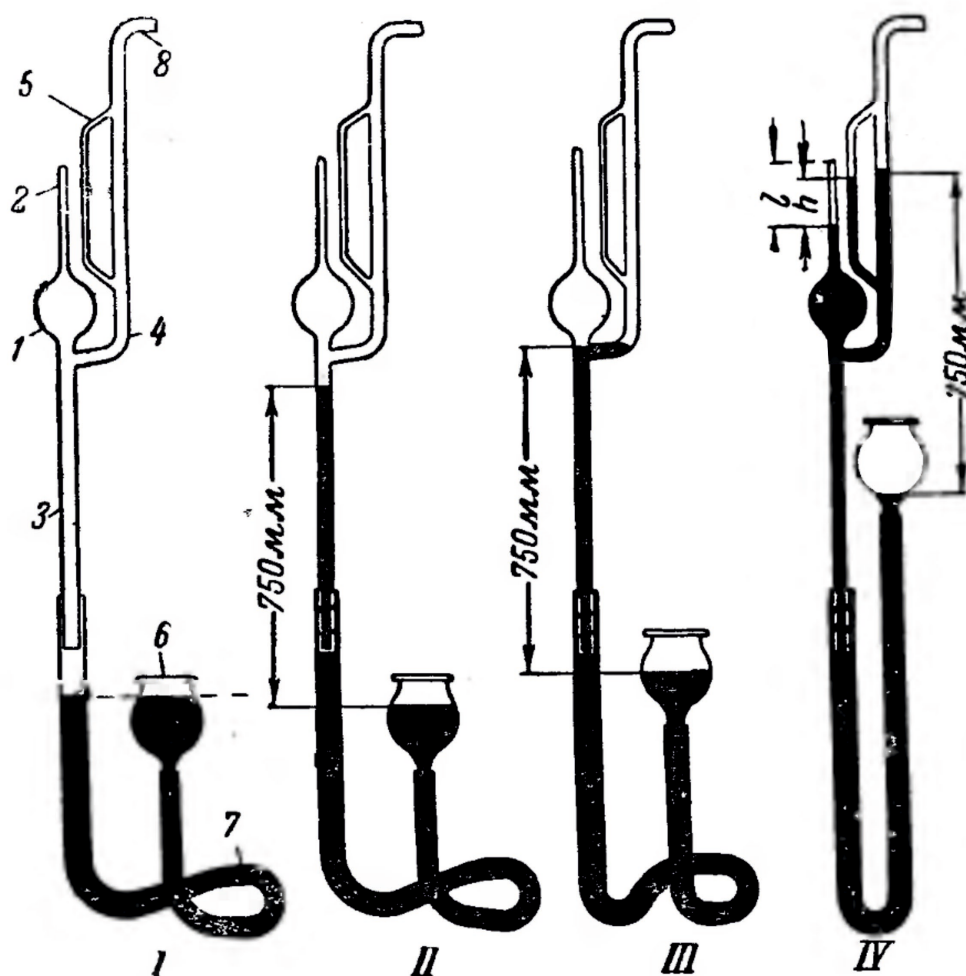


Рис. 18. Этапы измерения вакуума манометром Мак-Леода (I – IV). Компрессионный манометр: 1 – стеклянный баллон; 2 – измерительный капилляр; 3 – стеклянная трубка; 4 – ответвление; 5 – сравнительный капилляр; 6 – груша; 7 – резиновый шланг; 8 – трубка для присоединения к вакуумной системе [4, с. 202]

На третьем этапе (рис. 18-III) начинается собственно измерение. С помощью груши 6 уровень ртути поднимается и отсекает измерительное колено манометра от правого колена.

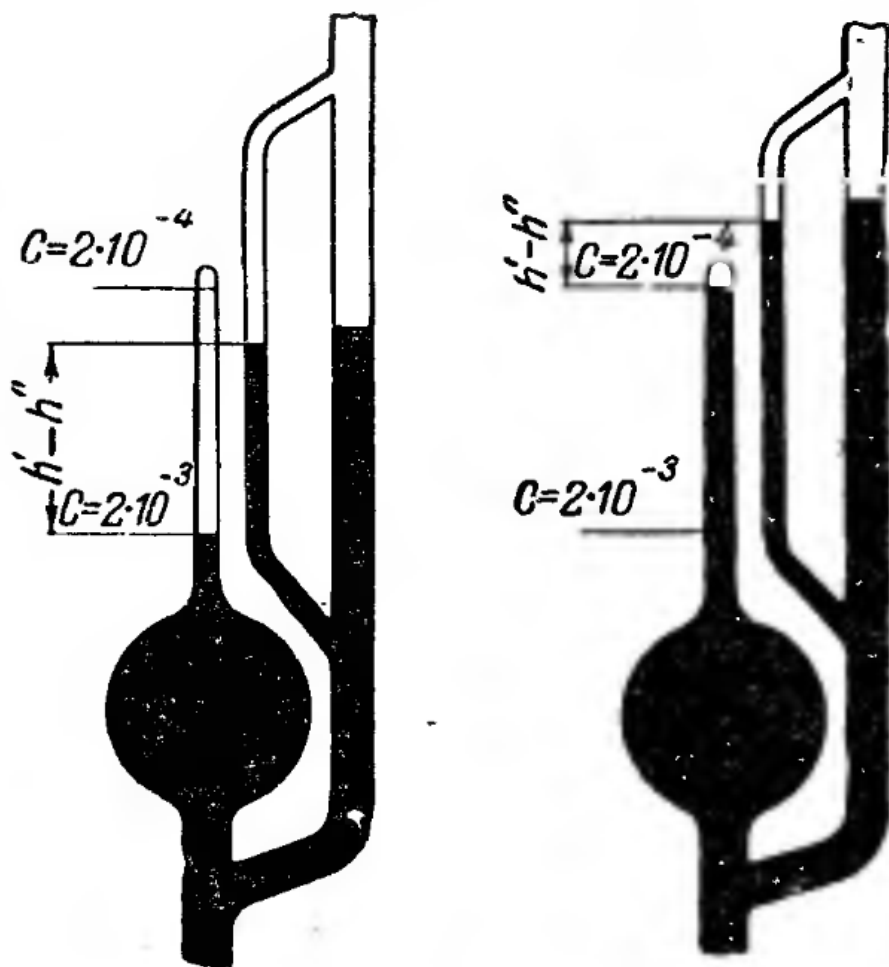


Рис. 19. Компрессионный манометр. Измерение давления методом линейной шкалы. Примеры меток на измерительном капилляре: $C = 2 \cdot 10^{-3}$ – для относительно больших давлений; $C = 2 \cdot 10^{-4}$ – для меньших давлений [4, с. 205]

Дальнейший подъем ртути (рис. 18-IV) приводит к компрессии газа в левом колене и простому поднятию её уровня в колене правом. Давление газа в последнем практически не меняется. Наконец, устанавливается разность уровней ртути в двух капиллярах h , точнее - Δh , и высота объёма сжатого газа l . Исходя из этих величин, при известном объёме и длине запаянного капилляра, можно рассчитать значение вакуума в вакуумной камере. Количество газа и его температура в левом (запаянном) колене манометра остаются неизменными, объём этого колена в момент перекрытия (колба плюс капилляр) V_1 известен, давление в момент перекрытия равно давлению в вакуумной камере p

(то есть – искомому). После сжатия газ находится в объёме V_2 , который определяется длиной незаполненного капилляра l (см. рис. 18-IV), а давление будет равно p плюс $\rho g \Delta h$, где Δh – разница уровней ртути в капиллярах (см. рис. 18-IV). Тогда, по закону Бойля-Мариотта, имеем:

$$pV_1 = (p + \rho g \Delta h)V_2, \quad (2)$$

откуда:

$$p = \frac{V_2}{V_1 - V_2} \rho g \Delta h \quad (3)$$

Существуют три основных метода измерения вакуума манометром Мак-Леода, основанных на том, что для конкретного вакуумметра объём V_1 и диаметр капилляра – величины строго постоянные, – **метод линейной шкалы, метод квадратичной шкалы и метод максимальной разности уровней.**

В **методе линейной шкалы** (рис. 19) на запаянном (измерительном) капилляре делаются метки, соответствующие какому-то, заранее заданному, объёму V_2 , например, метки $C = 2 \cdot 10^{-3}$ и $C = 2 \cdot 10^{-4}$. Введём обозначения: h_0 – горизонтальный уровень запаянного конца измерительного капилляра; h' – горизонтальный уровень ртути в сравнительном капилляре; h'' – горизонтальный уровень метки C . Объём V_2 определяется через диаметр капилляра d :

$$V_2 = \frac{\pi d^2}{4} l = \frac{\pi d^2}{4} (h_0 - h''). \quad (4)$$

Тогда **коэффициент компрессии**, соответствующий метке C , определяется как:

$$C = \frac{V_2}{V_1} \frac{1}{(h_0 - h'')} = \frac{\pi d^2}{4V_1}. \quad (5)$$

Из (3) имеем:

$$p = \frac{V_2}{V_1 - V_2} \rho g \Delta h = \frac{V_2}{V_1 - V_2} \cdot \frac{(h_0 - h'')V_1}{(h_0 - h'')V_1} \cdot \rho g (h' - h'') =$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{V_2 / ((h_0 - h'') V_1)}{V_1 / ((h_0 - h'') V_1) - V_2 / ((h_0 - h'') V_1)} \rho g (h' - h'') = \\
&= \frac{C}{1 / (h_0 - h'') - C} \rho g (h' - h'') = \\
&= \rho g C (h' - h'') \frac{(h_0 - h'')}{(h_0 - h'')} \cdot \frac{1}{1 / (h_0 - h'') - C}
\end{aligned}$$



Рис. 20. Компрессионный манометр. Измерение давления методом квадратичной шкалы [4, с. 206]

Окончательно получаем:

$$p = \rho g C \frac{(h' - h'')(h_0 - h'')}{1 - C(h_0 - h'')} \quad (6)$$

(здесь $\rho = 13,55 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – плотность ртути; $g = 9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ – ускорение свободного падения).

Для метода линейной шкалы уровни меток h'' . а значит и величины $(h_0 - h'')$, будут фиксированными, следовательно, могут быть рассчитаны коэффициенты компрессии линейной шкалы:

$$C_{л} = C \frac{(h_0 - h'')}{1 - C(h_0 - h'')} \quad (7)$$

Тогда:

$$p = \rho g C_{л} (h' - h'') \quad (8)$$

– **формула расчёта давления p в вакуумной камере по методу линейной шкалы.** Давление здесь пропорционально разнице уровней – «линейная» шкала.

На капилляре могут быть нанесены несколько меток, например, как уже говорилось, – метки $C = 2 \cdot 10^{-3}$ и $C = 2 \cdot 10^{-4}$ (рис. 19). Чем меньше расстояние от метки до запаянного конца капилляра (то есть, – чем выше метка), тем больше газ сжимается, и, следовательно, тем более глубокий вакуум можно измерить. Для измерения бóльших давлений следует пользоваться более низко расположенными метками, или, как альтернатива, – делать меньше колбу или толще капилляр.

По **методу квадратичной шкалы** (рис. 20) уровень ртути в сравнительном капилляре устанавливают вровень с запаянным концом измерительного капилляра, то есть:

$$(h' - h'') = (h_0 - h''). \quad (9)$$

При этом $C(h_0 - h'') \ll 1$, и из (7) и (8) получаем:

$$p = \rho g C \frac{(h' - h'')(h_0 - h'')}{1 - C(h_0 - h'')} = \rho g C (h_0 - h'')^2.$$

Таким образом, **формула расчёта давления p в вакуумной камере по методу квадратичной шкалы:**

$$p = \rho g C (h_0 - h'')^2 \quad (10)$$

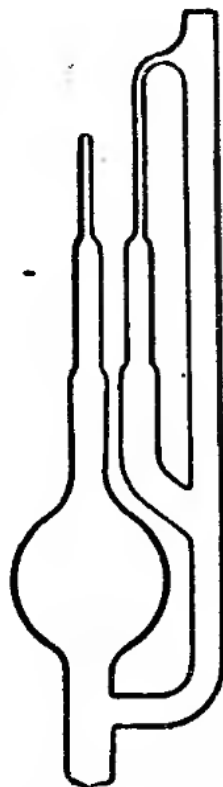


Рис. 21. Компрессионный манометр с тремя капиллярами [4, с. 206]

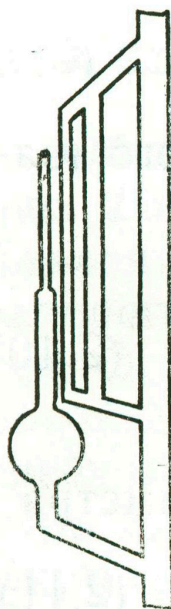


Рис. 22. Альтернативная конструкция компрессионного манометра с тремя капиллярами [1, с. 26]

(Название метода соответствует пропорциональности давления квадрату разности уровней).

В методе **максимальной разности уровней** добиваются максимально возможной разности уровней ртути в двух капиллярах ($h' - h''$), где h' – горизонтальный уровень ртути в сравнительном капилляре; h'' – он же, в измерительном капилляре [9, с. 526]. При этом должно соблюдаться условие $(h' - h'') \geq 7 \text{ мм}$, иначе погрешность измерений будет высока. В этом методе можно получить наивысшую

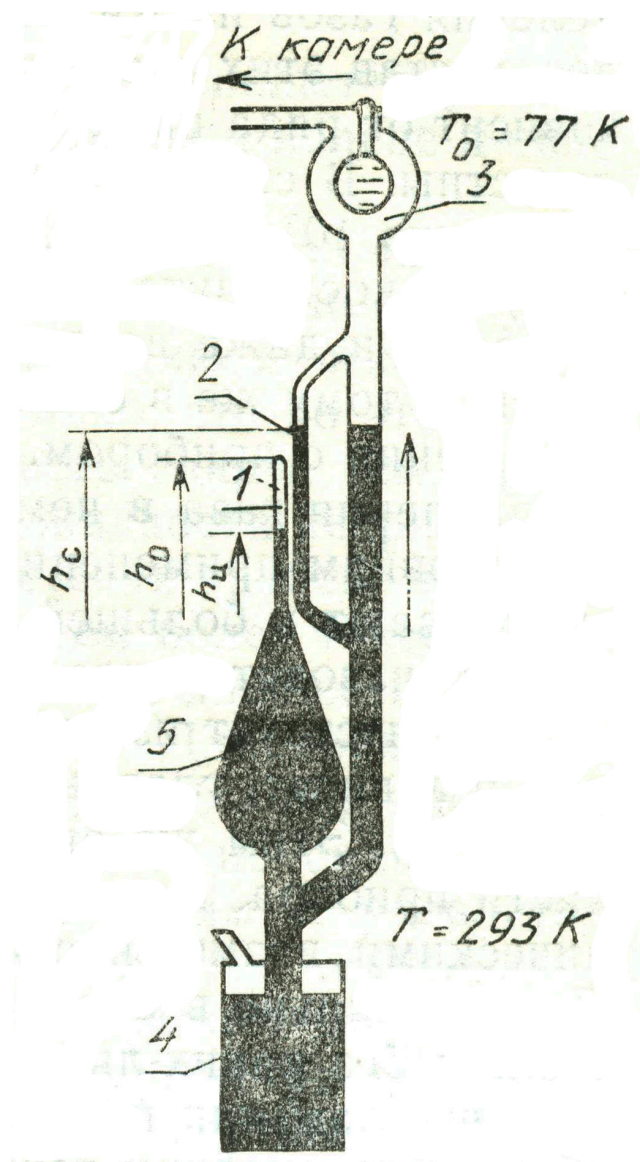


Рис. 23. Азотная ловушка компрессионного манометра. 1 – измерительный капилляр; 2 – сравнительный капилляр; 3 – азотная ловушка; 4 – резервуар со ртутью; 5 – колба [1, с. 21]

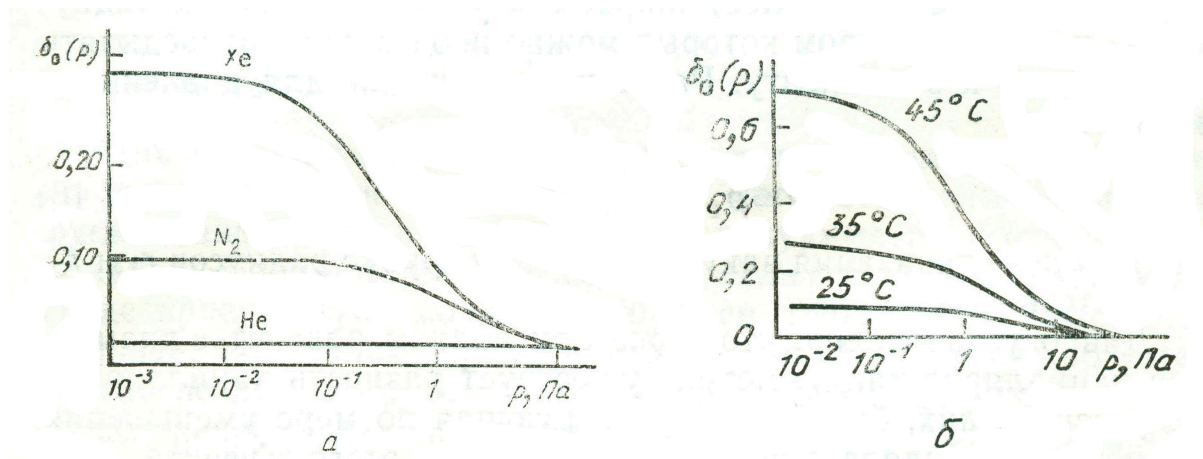


Рис. 24. Относительная погрешность $\delta_0(p)$, вносимая ОДРП, в зависимости от измеряемого давления p ; влияние рода газа (а) и температуры (б) [1, с. 27]

точность, так как уровни ртути не фиксированы и не требуется их подгонка к какой-то метке. Если измерения проводить, например, катетометром, то потребуется измерение трёх уровней: двух установившихся – h' и h'' , а также уровня запаянного конца капилляра h_0 . Расчёт давления можно провести по формулам (1) и (3).

Для более широкого охвата измеряемых давлений одним прибором, иногда манометры Мак-Леода делают с несколькими капиллярами разного диаметра – рис. 21 и 22. Альтернатива этому – применение наборов вакуумметров с пересекающимися диапазонами. Второй способ имеет ряд преимуществ. Методы измерения уровней ртути – те же, что и для U-образных манометров (см. §2). Требования к абсолютной минимальной разнице измеряемых уровней, как уже отмечалось, – $\Delta h \geq 7 \text{ мм}$ (иногда указывается значение $\Delta h \geq 10 \text{ мм}$). Компромиссным значением наименьшего диаметра капилляров является $0,5 \div 1,0 \text{ мм}$ (учитывается минимальное влияние капиллярных сил и технологичность изготовления длинных тонких капилляров постоянного сечения). Объём колбы со ртутью не должен превышать $1 \div 2 \text{ дм}^3$ по соображениям механической прочности. Таким образом, нижний предел давления, которое можно измерить компрессионным манометром, может составить $p_{\min} \geq 10^{-3} \div 10^{-2} \text{ Па}$.

При измерении низких давлений (то есть – высокого вакуума) существенную роль играет эффект **откачивающего действия ртутных паров (ОДРП)**. Для предотвращения проникновения паров ртути в вакуумную камеру между ней и манометром Мак-Леода необходимо устанавливать азотную ловушку, охлаждаемую жидким азотом (чаще всего) – рис. 23. Ловушка действует, как диффузионный парортутный насос: пары ртути устремляются к ловушке и увлекают за собой молекулы откачиваемого газа. Последний частично адсорбируется на ловушке, что и приводит к несколько более низкому давлению во внутреннем объёме манометра. Эффект ОДРП заметно проявляется при давлениях, сравнимых с давлением насыщенного пара ртути, и ниже. Считается, что этим эффектом можно пренебречь при $p > 1 \div 5 \text{ Па}$. Относительная погрешность, вносимая ОДРП, в зависимости от рода газа и температуры, представлена на рис. 24. Давление насыщенных паров ртути можно существенно снизить охлаждением узкой соединительной трубки между резервуаром и колбой (рис. 25).

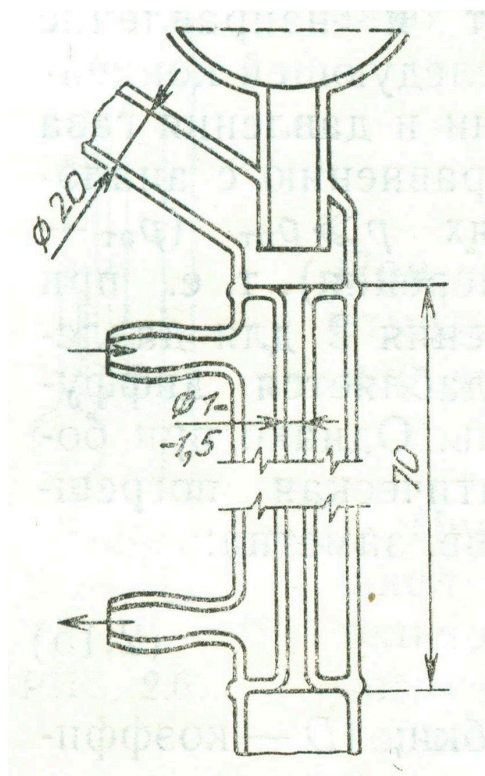


Рис. 25. Охлаждение проточной водой узкой соединительной трубки между резервуаром со ртутью и колбой [1, с. 28]

Что касается методов подъёма ртути в манометре при измерениях, самый простой и ныне устаревший метод был рассмотрен ранее (рис. 18). Основные недостатки этого метода – открытая ртуть и опасность разрыва резинового шланга под весом ртути. Более совершенный метод представлен на рис. 26. Здесь закрытый резервуар со ртутью представляет собой круглую колбу, в которую до самого дна погружена трубка, по которой ртуть поступает в верхнюю часть манометра (принцип действия сифона). С газовой фазой соединён

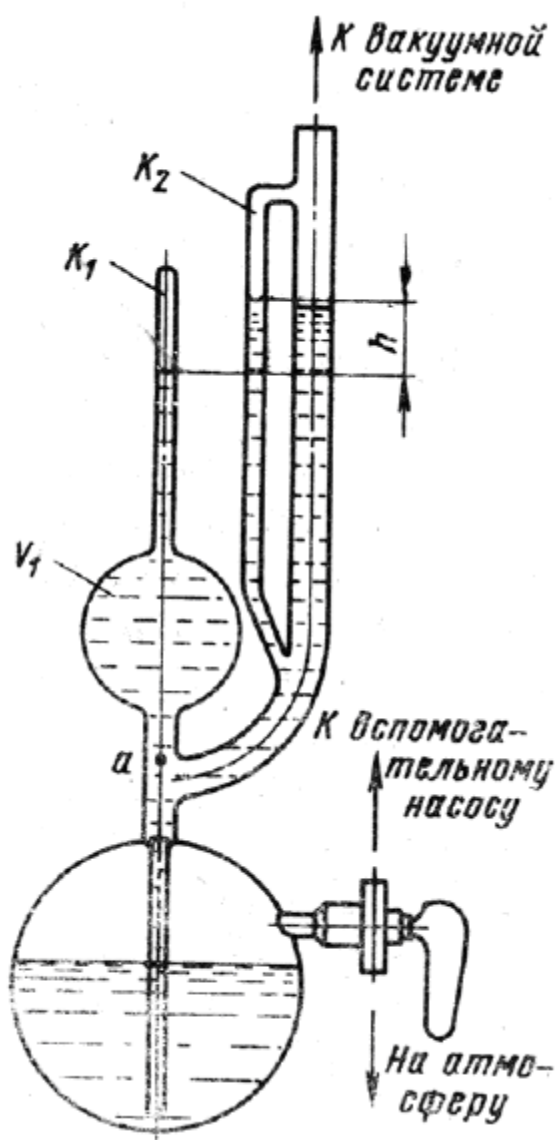


Рис. 26. Поднимание и опускание ртути в компрессионном манометре при помощи трехходового крана из неподвижного резервуара (стеклянного баллона) [3, с. 110]

трёхходовой кран, который может или быть перекрыт, или сообщаться с атмосферой, или подключаться к вспомогательной откачке или, наоборот, – к сжатому воздуху. Так или иначе, давлением в верхней части круглой колбы можно управлять, и ртуть будет подниматься или опускаться. Ещё один способ показан на рис. 27. Резервуар может быть или резиновым или металлическим сильфонным. Здесь также ртуть закрыта.

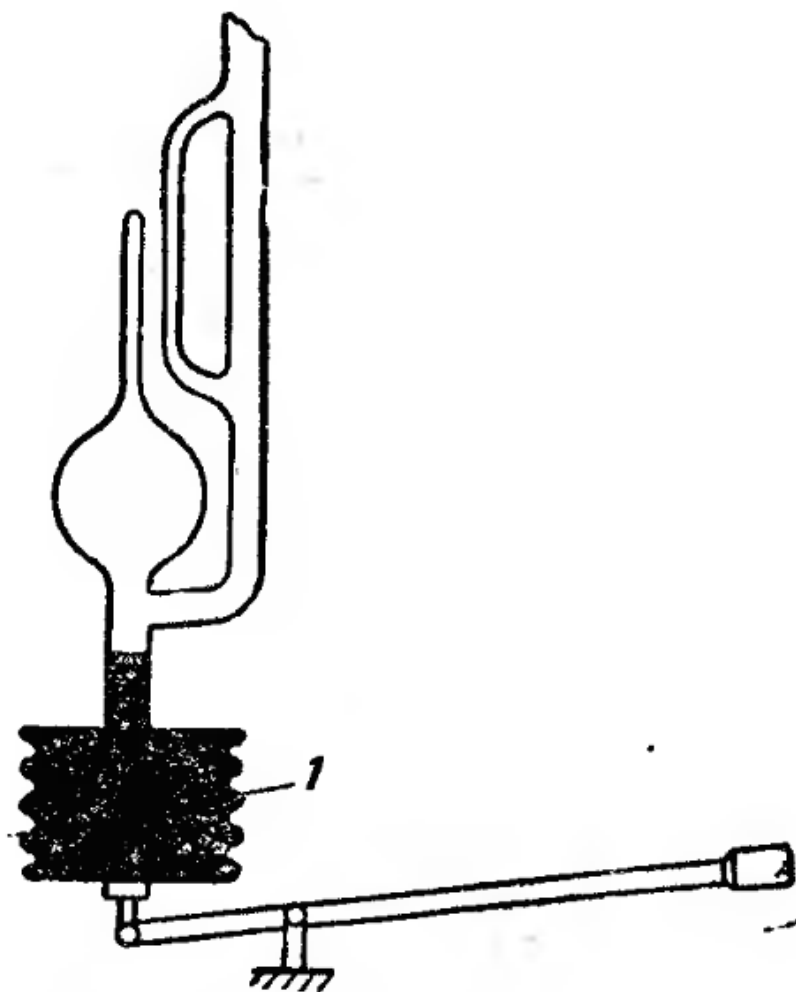


Рис. 27. Поднимание и опускание ртути в компрессионном манометре при помощи гофрированного резервуара [4, с. 214]

При поднимании ртути, если оно происходит резко, есть опасность её переливания в вакуумную камеру. Для предотвращения этого можно использовать клапан, изображённый на рис. 28. При быстром

поднятии ртути стеклянный клапан всплывает и перекрывает отверстие трубки.



Рис. 28. Стеклянный клапан, перекрывающий проходное отверстие при резком поднятии ртути [4, с. 214]

К недостаткам компрессионных манометров относится высокая трудоёмкость и длительность процесса измерения, токсичность ртути, периодичность измерений и невозможность их автоматизации. Чаще всего нельзя измерять давление паров, особенно конденсирующихся. При измерении очень низких давлений возможна ситуация, когда компрессия газа в измерительном колене происходит как бы «полностью» (то есть ртуть поднимается до самого верха запаянного конца капилляра), и ртуть может «прилипнуть», особенно если в капилляре имеются загрязнения. При этом даже опускание ртути в правом колене и сравнительном капилляре не ведёт к снижению уровня в капилляре измерительном (рис. 29).

Преимуществами этих манометров являются прежде всего абсолютный характер измерения (то есть это **первичные приборы** с точки зрения метрологии), высокая точность и надёжность, простота дей-

ствия, достаточно широкий диапазон измерений, независимость показаний от рода газа. Всё это позволяет использовать эти приборы как образцовые для градуировки других, более простых в эксплуатации вакуумметров, в диапазоне давлений от $10^{-3} - 10^{-2}$ Па до $10^2 - 10^3$ Па.



Рис. 29. Компрессионный манометр. Прилипание ртути [4, с. 210]

Минимальная погрешность измерения – $1 \div 3\%$. Методы расчёта погрешностей измерений рассмотрены в [10, с. 14 – 16].

v5 § 4. Деформационные трубчатые манометры

В деформационных вакуумметрах упругий чувствительный элемент разделяет две камеры (условно) с разным давлением. При этом элемент деформируется и механически прогибается в сторону меньшего давления. По величине деформации и определяют разность давлений. Таким образом, деформационные вакуумметры, как и жидкостные, являются дифференциальными приборами прямого действия.

Их показания также не зависят от рода газа и почти не зависят от температуры.

Одна из камер всегда является вакуумной, то есть той, в которой измеряют давление, а в качестве другой может выступать или атмосфера, или замкнутая камера с постоянным известным давлением, в том числе – вакуумом, с постоянной откачкой или нет.

По виду чувствительного элемента деформационные вакуумметры подразделяются на:

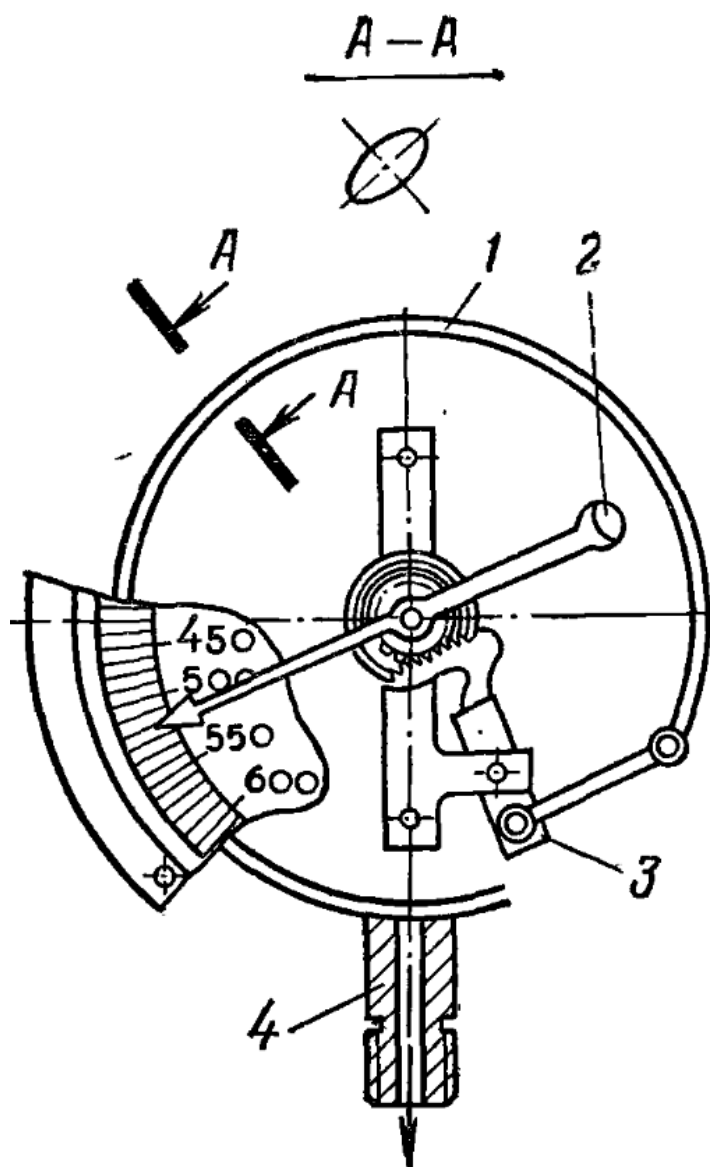


Рис. 30. Деформационный трубчатый манометр 1 – трубка эллиптического сечения; 2 – стрелка; 3 – зубчатый сектор; 4 – штуцер подсоединения к вакуумной системе [2, с. 189]

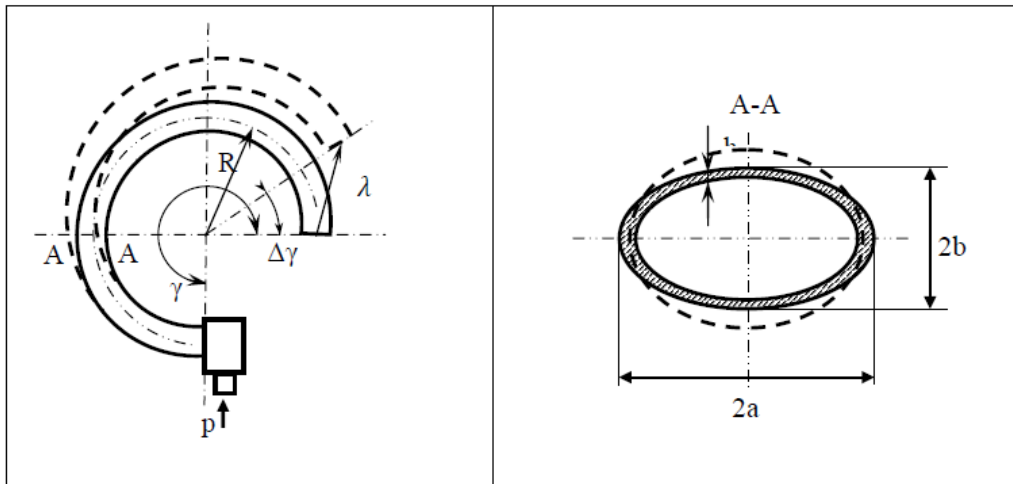


Рис. 31. Схема работы манометра Бурдона. Слева – «распрямление» трубки под действием повышенного давления внутри её по сравнению с внешним давлением. Справа – эллиптическое сечение трубки [13, с. 139]

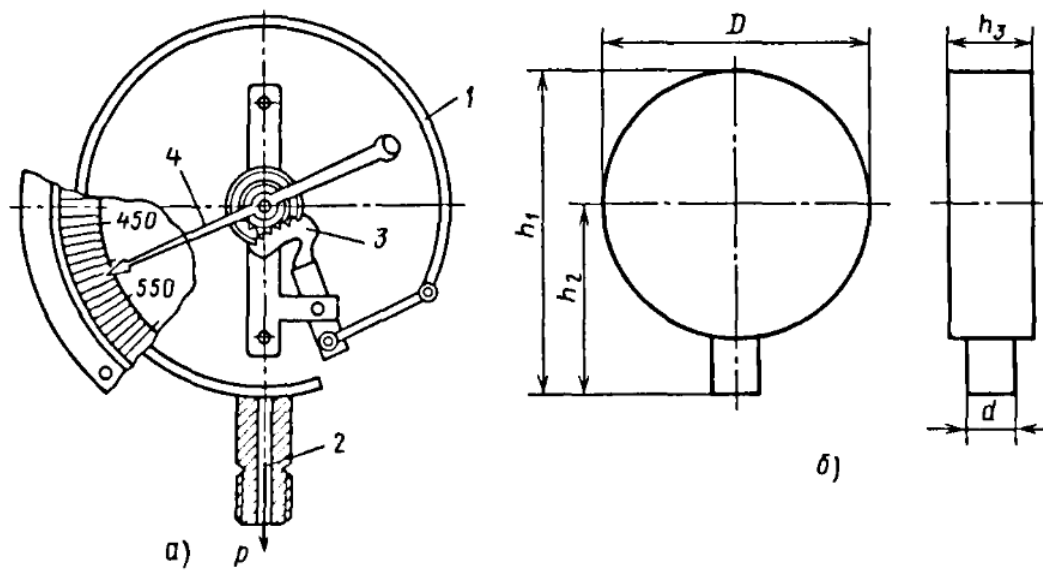


Рис. 32. Габаритный чертёж манометра Бурдона. 1 – эллиптическая трубка; 2 – штуцер для присоединения к вакуумной системе; 2 – зубчатый сектор; 3 – стрелка [9, с. 527]

- 1) трубчатые (пружинные) – манометры (или трубки) Бурдона;
- 2) сильфонные;
- 3) мембранные.

По способу регистрации деформации эти приборы бывают:

- 1) механические;
- 2) оптико-механические;
- 3) электрические:
 - индуктивные;
 - ёмкостные;
 - тензочувствительные;
- 4) электронно-механические (механотроны).

Трубчатые (пружинные) вакуумметры Бурдона (рис. 30) представляют собой запаянную с одного конца тонкостенную трубку 1 эллиптического сечения (А – А), другой конец которой через штуцер 4 соединяется с вакуумной системой. Трубка закручена в виде спирали или неполной окружности. При изменении давления внутри трубки она или немного распрямляется (если это давление больше внешнего), или немного больше закручивается (если оно меньше внешнего). Запаянный конец трубки соединён системой рычагов с зубчатым сектором 3, который, поворачиваясь, вращает центральное зубчатое колесо, соединённое со стрелкой 2.

Распрямление (или закручивание) трубчатой пружины происходит по следующей причине (рис. 31). Эллипс сечения вытянут параллельно оси манометра; трубку можно условно представить в виде двух концентрических лент, большего и меньшего диаметра, на которые действует одно и то же давление внутри трубки. Поскольку площадь внешней «ленты» больше, на неё изнутри действует большая сила, и система «распрямляется». Если же давление внутри трубки меньше внешнего, на наружную «ленту» извне действует большая сила, чем на «внутреннюю» и система закручивается больше. (См. также [13, с. 139 – 141]).

Описанная схема демонстрирует, что трубки Бурдона, имеющие одну и ту же принципиальную конструкцию, могут служить как для измерения повышенных по отношению к атмосфере давлений («распрямление» трубки), так и для измерения разрежений и вакуума («сжатие» или «закручивание» трубки). Соответственно этому приборы называются **трубчатые манометры** и **трубчатые вакуумметры**. Различие в конструкции будет касаться только показывающей стрелки: в манометре она будет двигаться по часовой стрелке, а в вакуумметре –

против. Это хорошо видно на рис. 34: нуль вакуумметра, который показывает исходное атмосферное давление, находится справа, и стрелка в спокойном состоянии находится на нуле. В манометрах всё наоборот.



Рис. 33. Внутреннее устройство манометра Бурдона. Вверху – вертикальный вид, внизу – горизонтальный [фото автора]



Рис. 34. Вакуумметр ВП-4у

[https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fwww.chvmz.ru%2Fassets%2Fcache_image%2Fassets%2Fupload%2Fimages%2Fcatalog%2Ftovar%2Fchvmz-130018136_0x0_787.jpg&lr=192&pos=11&rpt=simage&source=serp&text=вакуумметр%20образцовый%20деформационный]



Рис. 35. Вакуумметр ВО-11201

[https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Ftehbor.ru%2Fimage%2Fcache%2Fdata-raznoe-vo-11201-500x500.jpg&lr=192&p=1&pos=12&rpt=simage&source=serp&text=вакуумметр%20образцовый%20деформационный]

Габаритный чертёж манометра Бурдона показано на рис. 32 (они бывают разных общих размеров), а его внутренне устройство – на рис. 33.

Манометры Бурдона могут измерять давления до 250 атм и выше (даже до 10^4 атм), а вакуумметры – до 10^3 Па (от атмосферы). При точных измерениях необходимо учитывать значение атмосферного давления, так как эти приборы – дифференциальные. Точность вакуумметров обычно составляет 5% и может достигать до 2 – 3%. Характеристики трубчатых вакуумметров представлены в табл. 4. На рис. 34 представлен вакуумметр ВП-4у; а на рис. 35 – образцовый вакуумметр ВО-11201 (диапазон измерений $-0,1 \div 0 \text{ МПа}$).

Таблица 4. Основные технические характеристики вакуумметров трубчатого типа [7, с. 409]

Вакуумметр	Модель	Класс точности	Верхний предел измерений, МПа	Габаритные размеры (см. рис. 14.5), мм			
				D	h_1	h_2	h_3
Образцовый (ВО)	11201	0,4	0,1	160	205	125	60
	1227	0,25		250	310	165	90
Точных измерений (ВТИ)	1218	0,6; 1,0	0,06; 0,1	160	205	125	60

Примечание. Для вакуумметров указанных моделей $d = 27 \text{ мм}$.

В некоторых конструкциях вакуумметров запаянный конец трубки соединяется с упругой пластинкой, на которой устанавливаются тензодатчики; в других – в конструкцию вносится зеркальце, которое при перемещении запаянного конца перенаправляет лучик света, который фиксируется соответствующими устройствами. При измерениях возможно нахождение трубки Бурдона в вакуумной камере (внешнее давление будет равно нулю).

v6 § 5. Деформационные сифонные манометры

Чувствительным элементом сифонных манометров (вакуумметров) является **сиффон** – тонкостенная гофрированная металличе-

ская (как правило) трубка (рис. 36), которая может сжиматься и разжиматься вдоль своей оси, изгибаться по оси, но не может крутиться по этой оси даже на малый угол. В вакуумной технике в подавляющем большинстве случаев их изготавливают из нержавеющей стали.



Рис. 36. Сильфон 8421.1008088-10

[<https://yandex.ru/products/offer/ft3scCKhVbPCO655kx5k5w?retpath=%2Fsearch%3Ftext%3D%25D0%25A1%25D0%25B8%25D0%25BB%25D1%258C%25D1%2584%25D0%25BE%25D0%25BD&text=Сильфон>]

Сильфон будет деформироваться вдоль оси (сжиматься или разжиматься), если давление внутри и снаружи его будет разным. При этом чувствительность сильфонного устройства будет значительно выше, чем у трубчатых манометров. Чтобы избежать остаточных деформаций и большой нелинейности характеристик, сильфон в рабочем диапазоне должен деформироваться не очень сильно. Рабочий ход сильфона относительно «нулевого» положения в конкретном устройстве подбирают в зависимости от его размеров, жёсткости, свойств ма-

териала. Чаще всего одно отверстие сиффона жёстко закрыто и соединено с каким-то регистрирующим перемещение устройством, а второе – соединено с вакуумной камерой. Для предотвращения изгиба сиффона вдоль оси перемещение происходит по осевым направляющим стержням.

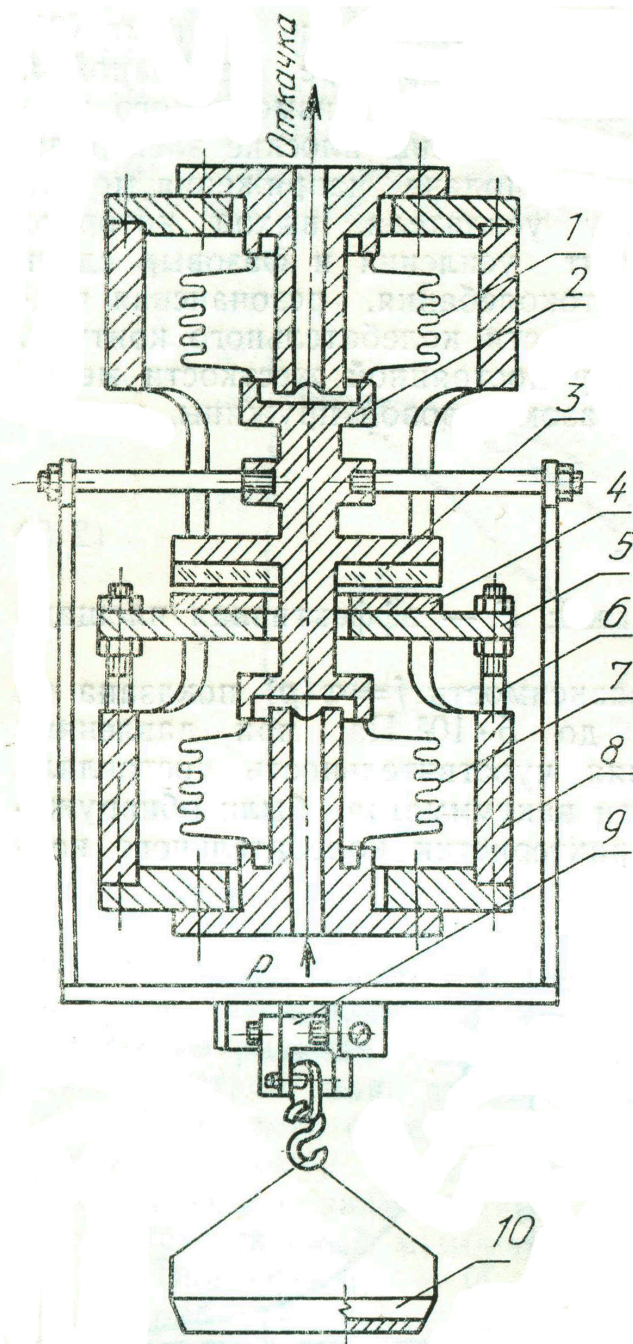


Рис. 37. Высокочувствительный сиффонный вакуумметр (обозначения – см. текст) [1, с. 18]

Высокочувствительный сифонный манометр Гликмана [14] представлен на рис. 37. Он состоит из двух идентичных сифонов – вакуумируемого 1 и сифона повышенного давления 7, которые жёстко связаны подвижной тягой 2. Сифон 1 под действием вакуума стремится поднять тягу 2 вверх; также и сифон 7 стремится поднять её вверх, но – уже под действием избыточного давления. Перемещению тяги 2 препятствует груз, подвешиваемый на коромысле, жёстко соединённом с тягой 2. Внизу к коромыслу крепится чашка 10 через вспомогательное устройство 9, которое позволяет избежать изгибающих моментов на сифонах. На чашку 10 и устанавливаются грузы (гири), по величине которых и можно судить об измеряемом вакууме или давлении, когда их действие скомпенсировано. Таким образом, мы имеем дело с компенсационной схемой, которая сводит на нет возможность остаточных деформаций сифонов. Контроль «нулевого состояния» осуществляется конденсатором, состоящим из подвижной обкладки 3 (стеклянная пластинка с проводящим покрытием), жёстко закреплённой на тяге 2, и неподвижной обкладки 4 (нержавеющая сталь), прикреплённой через клеевой слой к стальному треугольнику 5. Тот, в свою очередь, соединён с корпусом 8 шпильками 6. К корпусу также жёстко крепятся верхняя часть сифона 1 и нижняя часть сифона 7. Нуль-индикация осуществляется конденсатором и мостовой измерительной схемой.

При измерении вакуума относительно атмосферы верхний сифон соединяется с вакуумной камерой, а нижний – открыт на атмосферу. При измерении повышенного по отношению к атмосфере давления – всё наоборот. Чтобы измерить абсолютное давление в нижнем сифоне (оно может быть или повышенным, или разрежением или вакуумом определённой степени), верхний сифон соединяется с откачкой, обеспечивающей нулевое давление с требуемой точностью. При нижнем пределе измерений $1,5 \cdot 10^2 \text{ Па}$ относительная погрешность не превышает 1 – 2%, а при $p > 10^3 \div 10^4 \text{ Па}$ может быть существенно меньше 1%.

Особый вид сифонных вакуумметров представляют собой приборы, в регистрирующем устройстве которых используются **механотроны** – электронно-механические преобразователи. Они представ-

ляют собой электровакуумные лампы, в которых положением внутренних электродов можно управлять механическим воздействием снаружи. При этом меняется сила электронного или ионного тока, который и является выходным электрическим сигналом. Примером может служить механотронный сильфонный вакуумметр [15]. В нём перемещение при деформации передаётся подвижному стержню (он же – электрод) механотрона, включённого в мостовую схему. При измерении ток разбаланса этой схемы пропорционален измеряемому давлению. В приборе использован механотрон 6МХ1С и сильфоны малой жёсткости и большого диаметра, что позволило получить нижний предел измерений $0,1 \div 1 \text{ Па}$.

Диапазоны измерений механотронных преобразователей приведены в табл. 5, а в табл. 6 – технические характеристики промышленных вакуумметров сильфонного типа. Промышленные вакуумметры МАС-Э1 и МАС-Э3 имеют диапазоны измерений $0 \div 2,5 \cdot 10^4 \text{ Па}$ и $0 \div 4 \cdot 10^4 \text{ Па}$ соответственно.

Таблица 5. Диапазоны измерений механотронных преобразователей в Па [7, с. 409]

6МДХ12С	0,13 ..	$1,3 \cdot 10^2$
6МДХ4С	1,3 ...	$1,3 \cdot 10^3$
6МДХ5С	13 ...	$1,3 \cdot 10^4$
6МДХ11С	$6,7 \cdot 10^3$...	10^5

Таблица 6. Основные технические характеристики вакуумметров сильфонного типа [9, с. 528]

Вакуумметр	Модель	Верхний предел измерений p , МПа	Класс точности
ВС-Э1	9223	0,025	1,0; 1,5
	9523	0,04; 0,06; 0,1	0,6; 1,0; 1,5
МАС-Э1	9231	0,04	1,5
	9531	0,06; 0,1	1,0; 1,5
МАС-Э3	9233	0,006	2,5
		0,01	1,5; 2,5
		0,016	1,0; 1,5
		0,025	0,6; 1,0; 1,5
	0,04		

Достоинство сильфонных преобразователей давления – их высокая чувствительность; к недостаткам относится зависимость показаний от атмосферного давления, невысокая эксплуатационная надёжность, высокая чувствительность к вибрациям и гистерезис градуировочной характеристики. В настоящее время эти приборы используются редко и замещаются мембранными вакуумметрами.

v7 § 6. Деформационные мембранные манометры

В мембранных деформационных манометрах упругим элементом служит круглая мембрана толщиной примерно $0,02 \div 0,1$ мм. Материалом мембраны чаще всего является металл; встречаются также полимеры, кварц, сапфир. Мембрана разделяет собой две камеры: **сравнительную** (другие названия – опорная, эталонная, минусовая, нулевая) и **измерительную**. Последняя содержит газ, давление которого измеряется. Сравнительная камера содержит газ под каким-то постоянным известным давлением, чаще всего – вакуумом, при постоянной откачке или откачанный предварительно. Остаточное давление p_0 должно быть много меньше измеряемого.

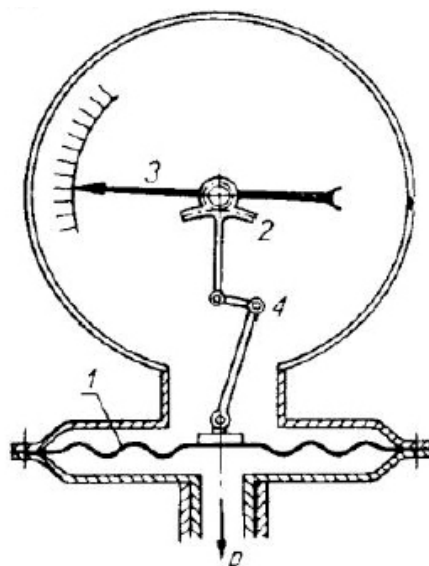


Рис. 38. Механический мембранный манометр: 1 – мембрана; 2 – зубчатая передача; 3 – стрелочный индикатор; 4 – рычаг; P — измеряемое давление [3, с. 108]

Разность давлений в двух камерах $p - p_0$ создаёт прогиб мембраны, который зависит от её жёсткости (материала), толщины и площади. При $p - p_0 > 10^2 \div 10^3 \text{ Па}$ прогиб можно зафиксировать механическими или оптико-механическими устройствами. На рис. 38 показан стрелочный мембранный манометр, устройство которого схоже с манометром Бурдона. На этом же принципе работает барометр-анероид (рис. 39).

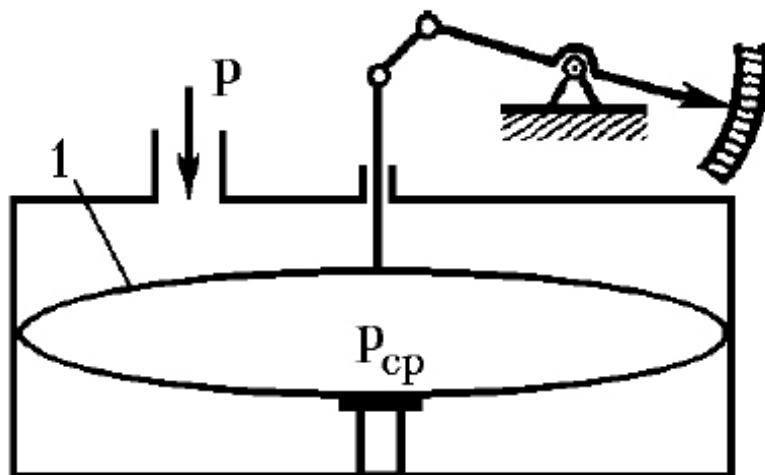


Рис. 39. Мембранный манометр. Барометр. 1 – двойная мембрана; $p_{ср}$ давление сравнения; p измеряемое атмосферное давление [12, с. 104]

Более совершенная конструкция стрелочного манометра, с откачанной камерой сравнения, представлена на рис. 40. Показания этого прибора не зависят от атмосферного давления.

Оптические микроманометры, выпускаемые промышленностью, имеют следующие параметры: ОМ6 – диапазоны измерений $0 \div 1,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$, $0 \div 2,7 \cdot 10^3 \text{ Па}$ и $0 \div 4 \cdot 10^3 \text{ Па}$, класс точности 1,0; ОМ7 – $0 \div 1,3 \cdot 10^2 \text{ Па}$ и 2,5. Существуют интерференционные оптические манометры.

На рис. 41 показано устройство мембранного (диафрагменного) вакуумметра DIAVAC повышенной точности. Чувствительный элемент – гофрированная диафрагма из специальной стали 4 разделяет входной патрубком 3 и герметичную камеру, откачанную до опорного давления 5 $p_{ref} < 10^{-1} \text{ Па}$.

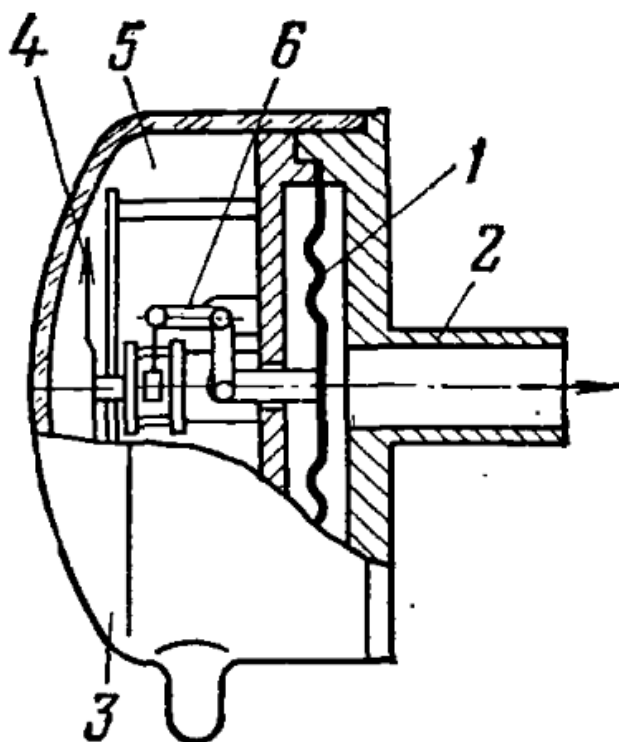


Рис. 40. Мембранный стрелочный манометр. 1 – мембрана; 2 – штуцер; 3 – корпус; 4 – стрелка; 5 – пространство, откачанное до давления $< 0,1 \text{ Па}$; 6 – рычаг [2, с. 190]

Таблица 7. Характеристики мембранных деформационных измерительных комплексов давлений [9, с. 529]

Измерительный комплекс	Диапазон измерений, кПа	Относительная погрешность выходного сигнала, %	Масса, кг
ИКД6ТДа-10	0,13...1,3	3	0,85
ИКД6ТДа-20	0,13...2,6		
ИКД6ТДа-30	0,13...3,9		
ИКД6ТДа-50	0,13...6,5		
ИКД6ТДа-100	0,13...13	1,5	0,7
ИКД6ТДа-200	0,13...26		
ИКД6ТДа-250	0,13...32		
ИКД6ТДа-400	0,13...52		
ИКД6ТДа-800	0,13...100		

Примечание. Диаметр комплексов 86 мм, длина 128...105 мм. Нет отсчетного устройства. Выходной сигнал – напряжение 0...6 В. Нелинейность характеристики не превышает $\pm 3\%$, для приборов типа 10 и 20 не более $\pm 1,5\%$.

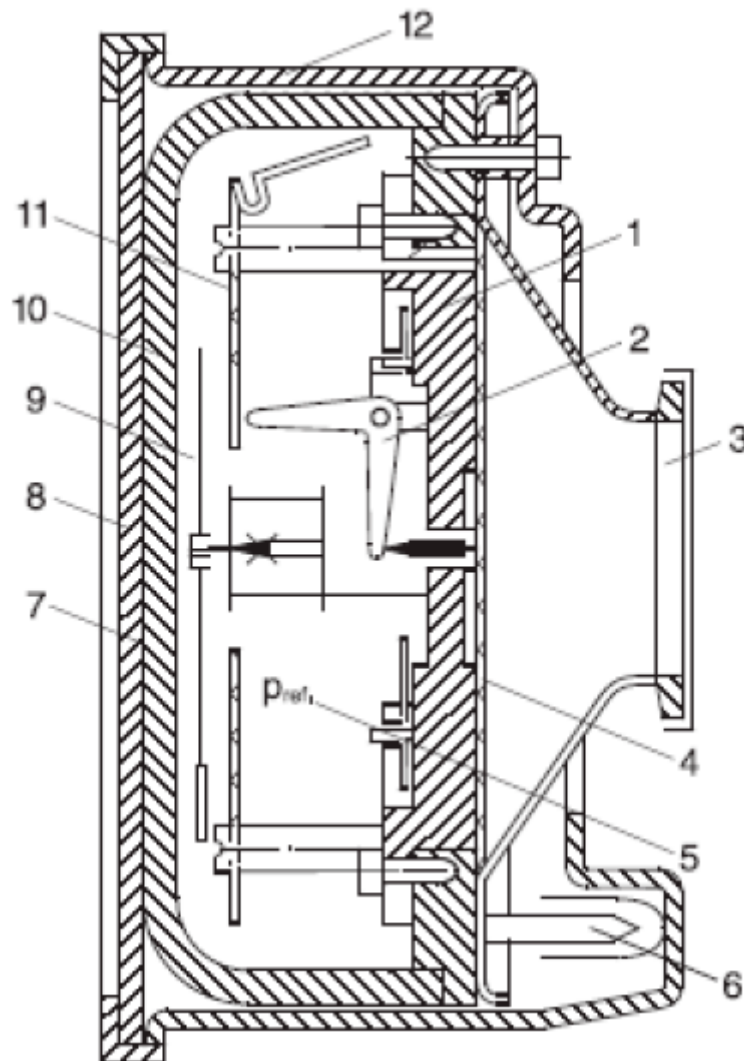


Рис. 41. Сечение диафрагменного вакуумметра DIAVAC. 1 – основание; 2 – система рычагов; 3 – соединительный фланец 4 – диафрагма; 5 – опорное давление p_{ref} ; 6 – конец отсечки; 7 – зеркало; 8 – оргстекло; 9 – указатель; 10 – стекло; 11 – установочная плата; 12 – корпус [16, с. 84]

Пока вакуумная камера не откачана, диафрагма 4 прижата к стенке основания 1. При откачке вакуумной камеры, в которой измеряется вакуум, происходит выгибание мембраны направо, которое становится заметным при давлении меньше 10^3 Па . Деформация мембраны передаётся через систему рычагов 2 на указатель 9. Диапазон измерения вакуумметра DIAVAC $10^2 \div 10^4 \text{ Па}$. точность измерений для диапазона $10^2 \div 2 \cdot 10^3 \text{ Па}$ около $\pm 30 \text{ Па}$. Вакуумметр несколько более

чувствителен к вибрациям, чем обычные приборы подобного устройства.

При $p - p_0 < 10^2 \text{ Па}$ механические и оптические методы фиксации уже не пригодны, так как деформация мембраны очень мала. В этом случае используются тензометрические, индуктивные и ёмкостные системы, а также механотроны.

В мембранно-индуктивных вакуумметрах меняется взаимная индукция двух контуров. один из которых прикреплён к мембране, а второй находится вблизи неё и неподвижен. Характеристики таких вакуумметров приведены в табл. 7.

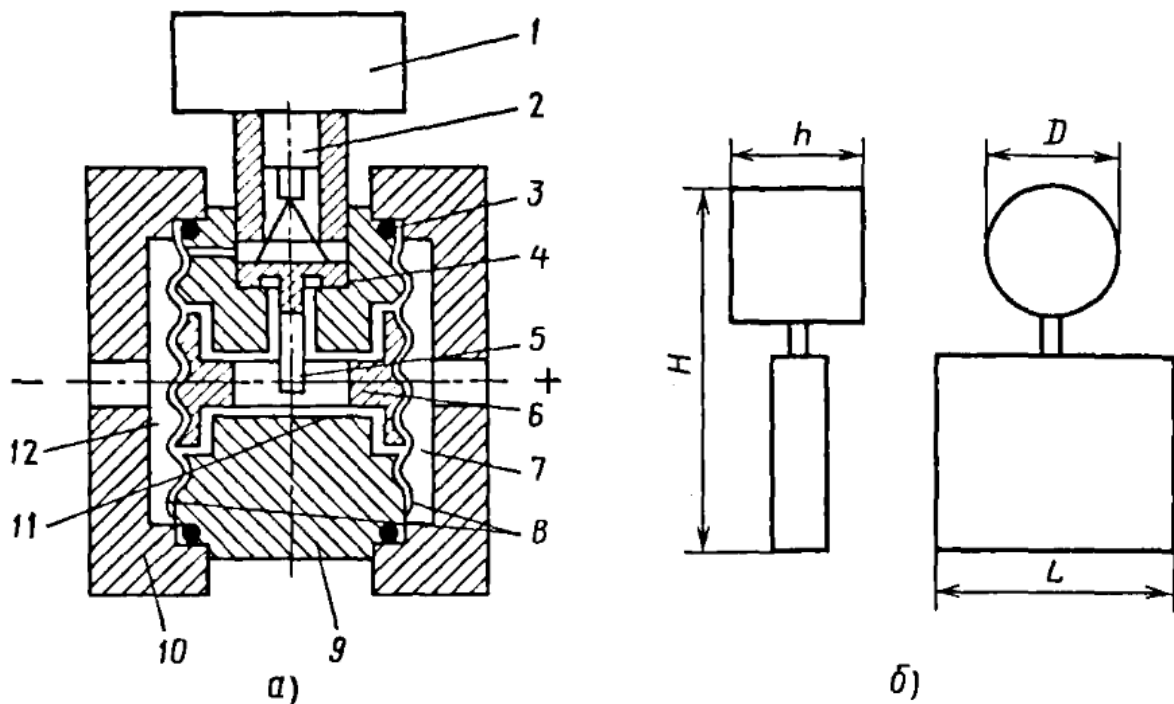


Рис. 42. Схема (а) и габаритный чертеж (б) преобразователя «Сапфир-22». 1 – электронное устройство; 2 – гермоввод; 3 – прокладки; 4 – тензопреобразователь; 5 – тяга; 6 – центральный шток; 7 – камера; 8 – гофрированные мембраны; 9 – основание; 10 – фланцы; 11 – замкнутая полость; 12 – камера [9, с. 530]

Примером мембранных вакуумметров с тензопреобразователями могут служить автоматические приборы типа «Сапфир-22» (рис. 42) с непрерывным преобразованием измеряемого давления в выходной

электрический сигнал. Эти приборы могут входить в системы автоматического контроля, регулирования и управления технологическими процессами. Две гофрированные мембраны 8 через прокладки 3 образуют во фланцах 10 две камеры – камеру бóльшего давления 7 и камеру меньшего давления 12. Меньшее давление близко нулевому и приборы (модели 2020 – 2040) измеряют абсолютное давление. Если измеряемое давление подается в камеру 12, а камера 7 сообщается с атмосферой, то приборы измеряют перепады давлений (модели 2210 – 2240). По своему наружному контуру мембраны приварены к основанию 9 и прилегают к центральному штоку 6, который может передавать смещение одной мембраны другой мембране. Шток 6 и основание 9 повторяют рельеф мембран в месте соприкосновения с ними. Внутреннее пространство между мембранами представляет собой замкнутую полость 11, заполненную кремнийорганической жидкостью. Разность давлений в камерах 7 и 12 вызывает прогиб мембран 8, смещение штока 6, который через тягу 5 воздействует на рычаг и мембрану тензопреобразователя 4. Последний

Таблица 8. Технические характеристики мембранных преобразователей типа «Сапфир-22» [9, с. 530]

Преобразователь	Модель	Верхний предел измерений давления, кПа	Класс точности	Масса, кг
«Сапфир-22ДА» (измерение абсолютного давления)	2020	2,5; 4,0	1,0	4,0
		6,0	0,5	
		10,0	0,25; 0,5	
	2030	6	0,5	5,0
		10 ; 16; 25; 40	0,25	
		40; 60; 100; 160; 250;	0,25; 0,5	
«Сапфир-22ДВ» (измерение перепадов давления)	2210	0,25	1,0	8,0
		0,4; 0,6	0,5	
		1,0; 1,6; 2,5	0,25; 0,5	
	2220	2,5; 4,0; 6,0; 10,0	0,5	4,0
		6,0; 10,0		
	2230	16	0,25	5,0
		25; 40	0,25; 0,5	
	2240	40; 60; 100		

Примечание. Размеры преобразователей $\leq 255 \times 182 \times 112$ мм. Предельные значения выходных сигналов 0...5; 0...20 мА или 4...20 мА постоянного тока.

размещён внутри основания 9. Мембрана тензопреобразователя изгибается и сопротивления тензорезисторов меняются. Полученный электрический сигнал по проводам через гермоввод 2 передается в электронное устройство 1 и обрабатывается. Технические характеристики мембранных преобразователей «Сапфир-22» представлены в табл. 8.

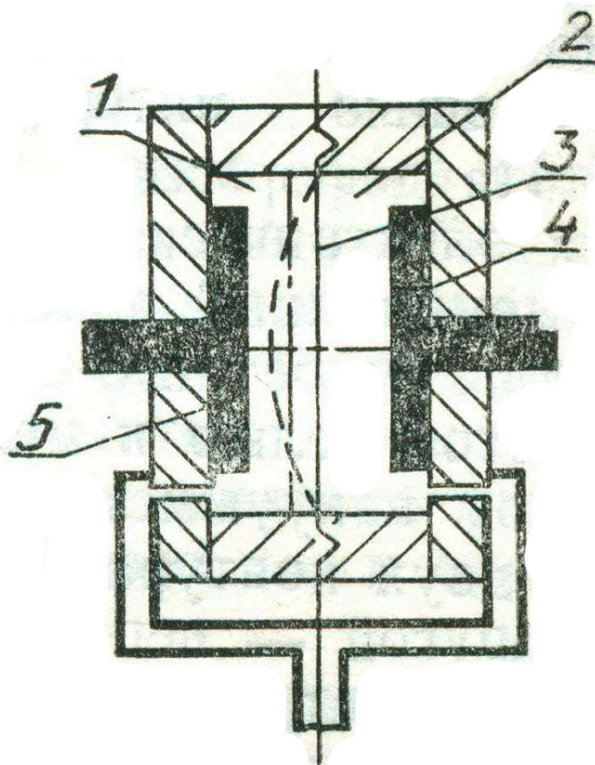


Рис. 43. Мембранный вакуумметр с частотным выходом. 1, 2 – камеры; 3 – мембрана; 4, 5 – электроды [1, с. 16]

Мембранный вакуумметр с частотным выходом [17] – представляет собой две камеры 1 и 2, разделённых мембраной 3 – рис. 43. Но в нижней части камеры сообщаются между собой и соединены с вакуумной камерой, в которой измеряется давление. С внутренней стороны к камерам приклеиваются изолированные плоские электроды 4 и 5. Один электрод подключается к входу электронного усилителя, другой – к его выходу. Коэффициент усиления и фазовый сдвиг усилителя подбирают таким образом, чтобы при подаче на электроды напряжения возникали автоколебания, резонансная частота f которых будет зависеть от ди-

динамической жёсткости колебательного контура. Динамическая жёсткость равна сумме жёсткости самой мембраны (постоянная величина) и жёсткости колебаний газовой фазы z_2 в камерах 4 и 5 (газ будет сжиматься и разжиматься в них). Последняя будет связана с измеряемым давлением:

$$z_2 = \frac{2\gamma Fp}{l}, \quad (11)$$

где γ – показатель адиабаты газа, F – эффективная площадь мембраны.

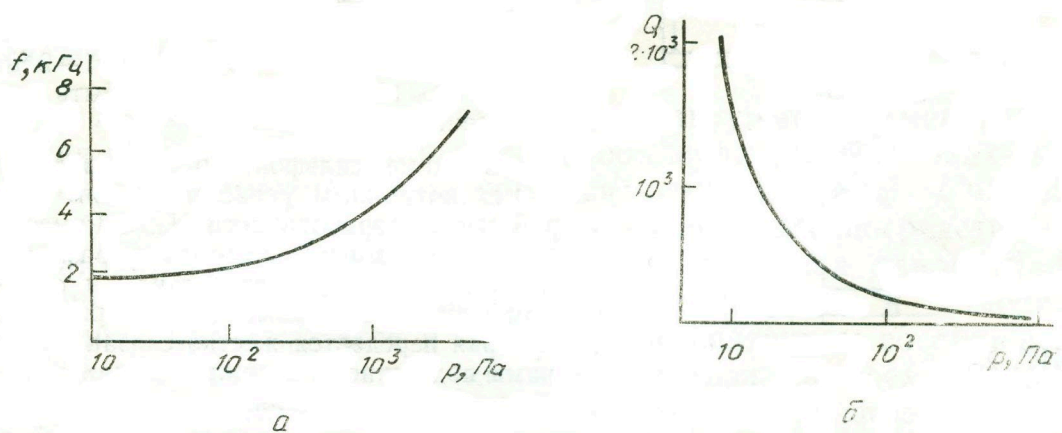


Рис. 44. Зависимость резонансной частоты f от давления (а) и зависимость добротности Q от давления (б) [1, с. 17]

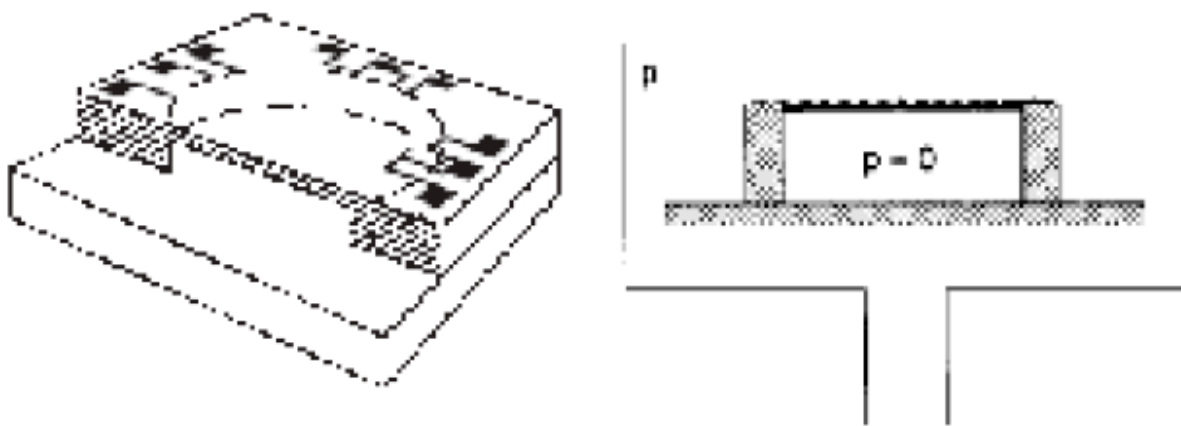


Рис. 45. Пьезоэлектрический преобразователь PIEZOVAC фирмы Lebold (базовая диаграмма) [16, с. 85]

Выходная электрическая характеристика $f = \varphi(p)$ показана на рис. 44а, а зависимость добротности от давления – на рис. 44б. Диапазон измерений $50 \div 5 \cdot 10^3 \text{ Па}$; относительная погрешность – меньше 5%.

Пьезоэлектрический преобразователь PIEZOVAC фирмы Lebold представлен на рис. 45. В нём используется кремниевая диафрагма, на поверхности которой крепятся 4 сопротивления, составляющие мостовую схему; сигнал разбаланса, линейно зависящий от давления, является выходным электрическим сигналом.

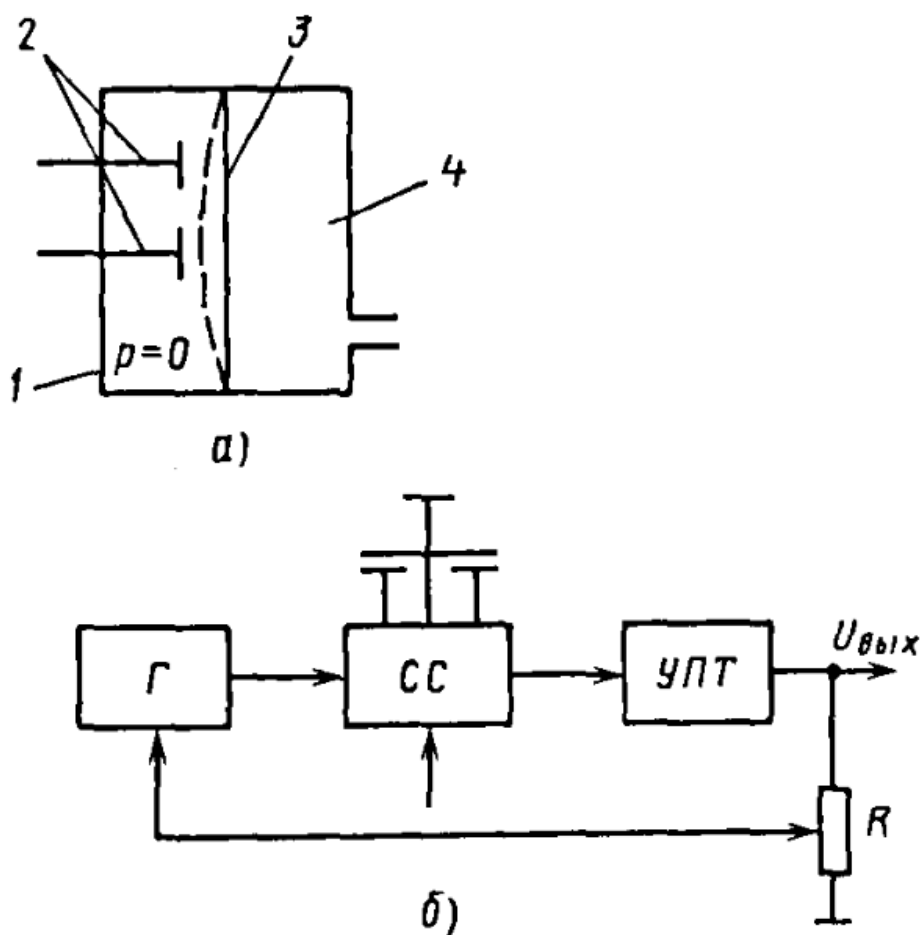


Рис. 46. Принципиальная схема мембранио-ёмкостного преобразователя давления (а) и структурная схема (б) его измерительного устройства: 1 – вакуумированная камера; 2 – обкладки конденсаторов; 3 – мембрана; 4 – измерительная камера; Г – генератор переменного напряжения (30...50 кГц); СС – схема сравнения; УПТ – усилитель постоянного тока; R – регулятор нелинейности [9, с. 531]

В настоящее время наиболее перспективным и широко используемым является ёмкостной способ фиксации прогиба мембраны. Соответствующие вакуумметры называются **мембранно-ёмкостными**. В них сама мембрана и расположенный вблизи неподвижный электрод составляют обкладки конденсатора, ёмкость которого меняется при изменении давления и прогиба мембраны (рис. 46). Простейшее измерительное устройство состоит из генератор переменного напряжения Γ (например, $30 \div 50 \text{ кГц}$); схемы сравнения СС, усилителя постоянного тока УПТ и переменного резистора R – регулятора нелинейности. Выходной электрический сигнал – напряжение $U_{\text{вых}}$.

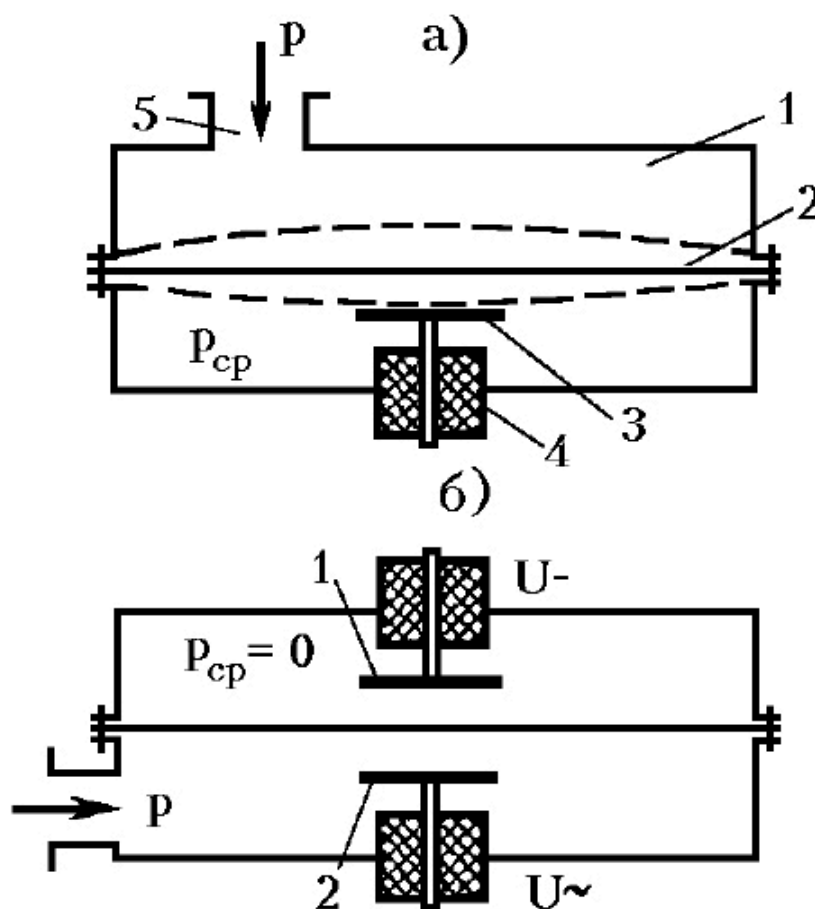


Рис. 47. Мембранно-ёмкостной преобразователь с одним (а) и двумя (б) электродами. а) 1 – корпус; 2 – мембрана; 3 – электрод; 4 – изолятор; 5 – патрубок присоединения к вакуумной камере. б) 1 – электрод постоянного напряжения; 2 – электрод переменного напряжения. p – измеряемое давление; p_{cp} – давление сравнения [12, с. 104]

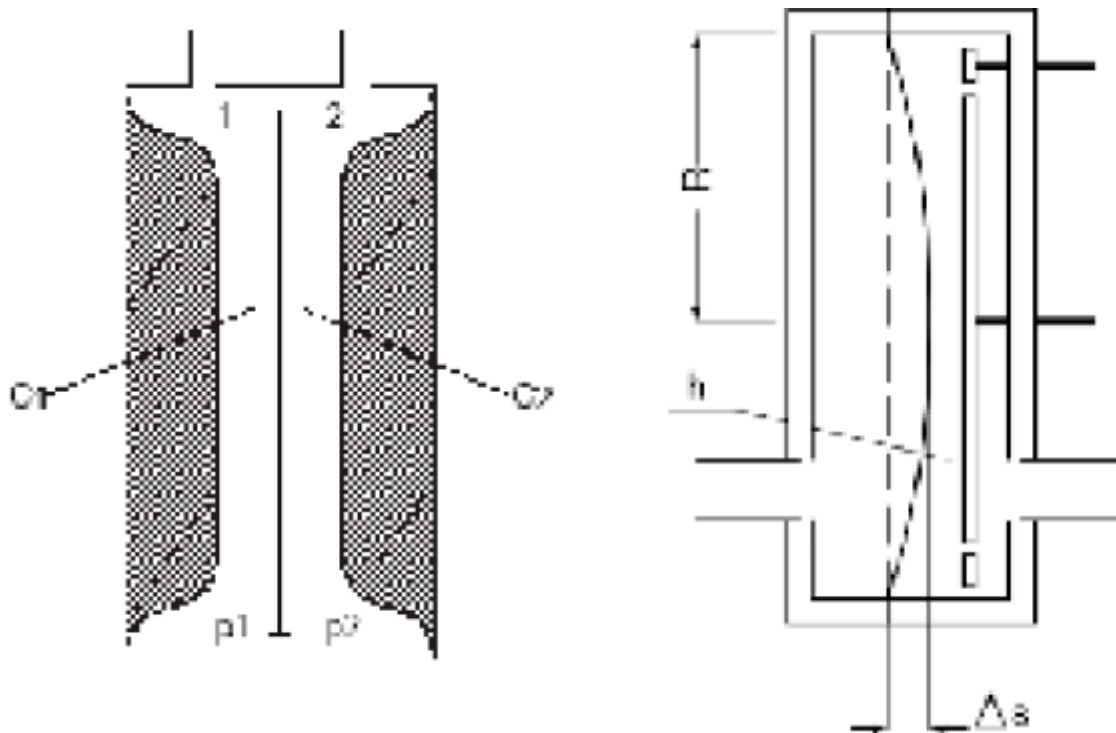


Рис. 48. Ёмкостной преобразователь фирмы Lebold (базовая диаграмма) [16, с. 85]

На рис 47 показаны схемы преобразователей с одним и двумя электродами конденсатора. На схеме а) показано, что мембрана может отклоняться в ту или другую сторону в зависимости от соотношения измеряемого давления p и давления сравнения p_{cp} . Выходным электрическим сигналом является ёмкость конденсатора. На схеме с двумя электродами (б) в момент измерения мембрана не изгибается, то есть находится в спокойном состоянии, что значительно повышает точность измерений и воспроизводимость результатов из-за отсутствия остаточных деформаций и напряжений мембраны (компенсационный метод). К электроду 2 прикладывается переменное напряжение, определяющее ёмкость и положение мембраны, когда обе камеры откачаны до условного нуля. При измерении давления p на электрод 1 подаётся постоянное напряжение, которое компенсирует воздействие p за счет электростатических сил и возвращает мембрану в исходное положение. Выходным электрическим сигналом здесь и служит подаваемое постоянное напряжение, квадрат которого пропорционален измеряемому давлению.

В нашей стране выпускался серийно мембранно-ёмкостной вакуумметр ВД-1 с рабочим диапазоном $1,3 \div 1,3 \cdot 10^3 \text{ Па}$ и относительной погрешности от 13% до 5% соответственно [18].

Так как линейность показаний сохраняется только при небольших деформациях мембраны, один преобразователь может охватить давления, лежащие в пределах 2 – 3 порядков. В общем случае, при использовании нескольких преобразователей, диапазон измерений может составить $10^{-1} \div 10^5 \text{ Па}$. Нижний предел измерения ограничивается температурными деформациями, минимальной жесткостью и прочностью мембраны.

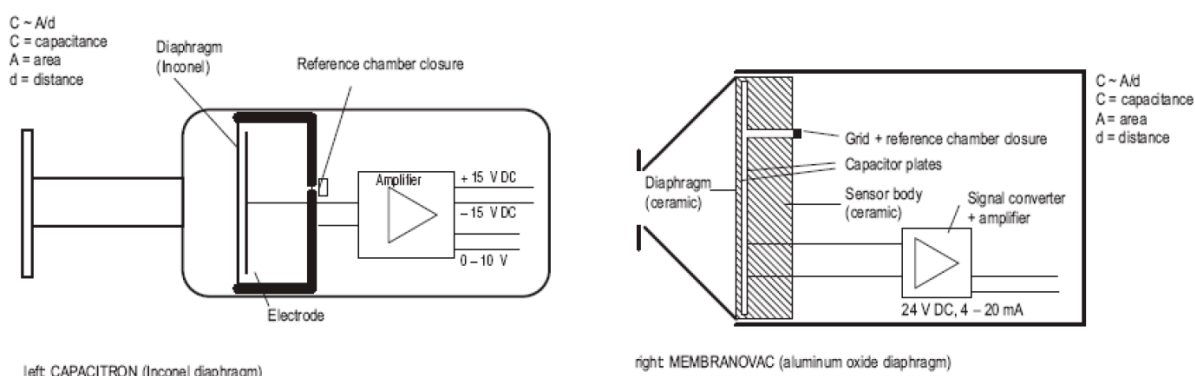


Рис. 49. Ёмкостные вакуумметры фирмы Lebold (базовая диаграмма) [16, с. 86]

В ёмкостных преобразователях фирмы Lebold (рис. 48) осуществлена схема с одним электродом и используются металлические и керамические мембраны. Структура таких преобразователей идентична и показана на рис. 49. При этом выпускаются два основных вида преобразователей: 1) преобразователи DI200 и DI2000 с мембранами из оксида алюминия, стойкие к перегрузкам по давлению; комплектуются с вакуумметрами MEMBRANOVAC DM11 и DM12; 2) преобразователи SM1, DM10, SM100, SM 1000 с мембранами из инконеля с очень высоким разрешением; они комплектуются с приборами DM21 и DM22.

В настоящее время признанными лидерами мембранно-ёмкостных вакуумметров являются приборы марки «Баратрон» фирмы «МКС Инструментс» (США) – 90% мирового рынка среди подобных датчиков (рис. 50). Вакуумметры серий 170, 200, 400, включающие несколько разнодиапазонных преобразователей, охватывают диапазон от

10^{-1} - 10^{-2} Па (в некоторых случаях – до 10^{-3} Па) до 10^3 - 10^4 Па. Погрешности – от 0,1% до 3%. В настоящее время, в частности – для серии 600, диапазон составляет 10^{-4} ÷ $35 \cdot 10^5$ Па при погрешностях от 0,25% до 0,05% от показания. Последние модели позволяют измерять давление до 200 бар с точностью 1% от показания



Рис. 50 Мембранно-ёмкостной вакуумметр марки «Баратрон»
[<https://blms.ru>]

Принципиальная схема датчика «Баратрон» показана на рис. 51. В настоящее время все преобразователи изготавливаются с электродами, расположенными с одной стороны от мембраны. Так как датчик разделён на две камеры, газ, давление которого измеряется, будет находиться в контакте только с входной камерой и самой мембраной. Поскольку они изготавливаются из нержавеющей стали и инконеля, показания прибора не будут зависеть от природы газа, который может быть, в том числе, – агрессивным или обладать коррозионными свойствами. Электроды же выполнены из керамики, покрытой палладием. В данном случае сознательно применяется менее стабильная схема (см. рис. 47), дающая эти преимущества, так как точность и стабильность достигается за счёт других факторов.

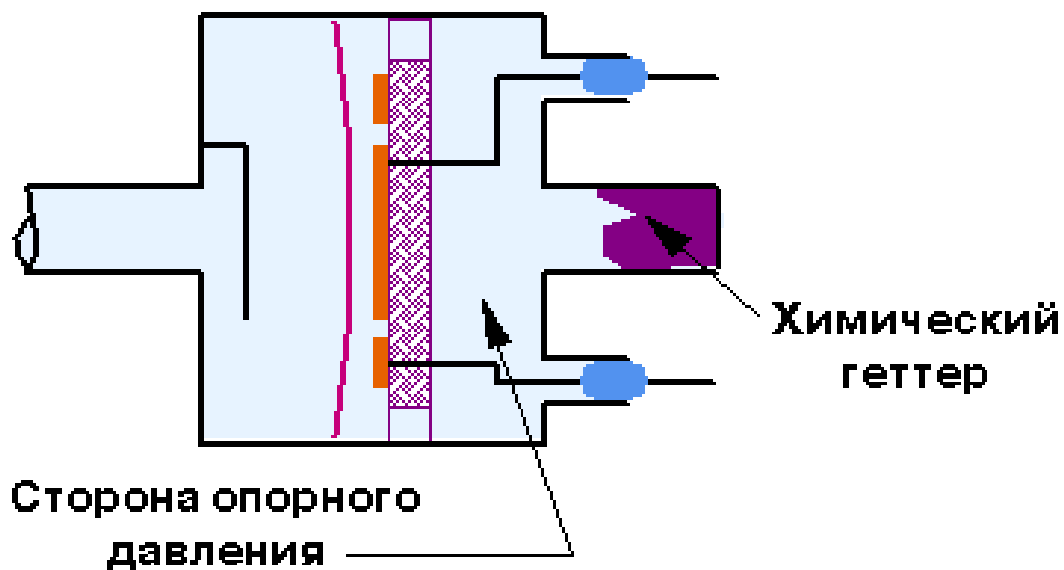


Рис. 51. Принципиальная схема датчика «Баратрон»
 [https://tuap-spb.narod.ru/ru/mks_baratron_design.htm]



Рис. 52. датчики «Баратрон». Высокоэффективные преобразователи давления. Преобразователи и переключатели давления общего назначения
 [<https://www.mks.com/c/capacitance-manometers>]

Если камера опорного давления (рис. 51) откачана (до $\sim 10^{-7}$ Torr), то в ней помещается геттер, позволяющий долгое время поддерживать высокий вакуум. Мембрана и электроды конденсатора

образуют переменную ёмкость, которая включена в плечи измерительного моста. Последний сбалансирован, когда давление по обеим сторонам мембраны одинаково. При измерении мост разбалансируется и полученный сигнал усиливается и демодулируется, превращаясь в сигнал постоянного тока.

Датчик «Баратрон» может быть выполнен и по дифференциальной модели. в которой, в отличие от модели абсолютной, в камеру с электродами подаётся некоторое опорное давление известной величины (в том числе – атмосферное).

Для уменьшения влияния изменения температуры на показания датчика «Баратрон» компания «MKS Instruments» разработала и внедрила ряд конструктивных мер: температурную компенсацию и термостатирование. В наиболее точных моделях 600-й серии применяются оба метода, что дает возможность получить температурный коэффициент дрейфа нуля лучше, чем 0,0004 % на 1°C.



Baratron® Power Supplies & Displays

Рис. 53. Блок питания и дисплеи Baratron®
[<https://www.mks.com/c/capacitance-manometers>]

Компания «MKS Instruments» выпускает не только датчики давления, но и вторичные сопутствующие электронные блоки – измерительные и блоки питания (рис. 53). Таким образом, они составляют единые измерительные комплексы.

v9 § 1. Теоретические основы тепловой вакуумметрии

Тепловые (теплоэлектрические) вакуумметры используют зависимость теплопроводности газа от его давления в некотором диапазоне вакуума – рис. 54. В основе их устройства стоит нагретая металлическая (как правило) нить накала радиусом r_1 и холодный баллон радиусом r_2 , между которыми происходит теплообмен.

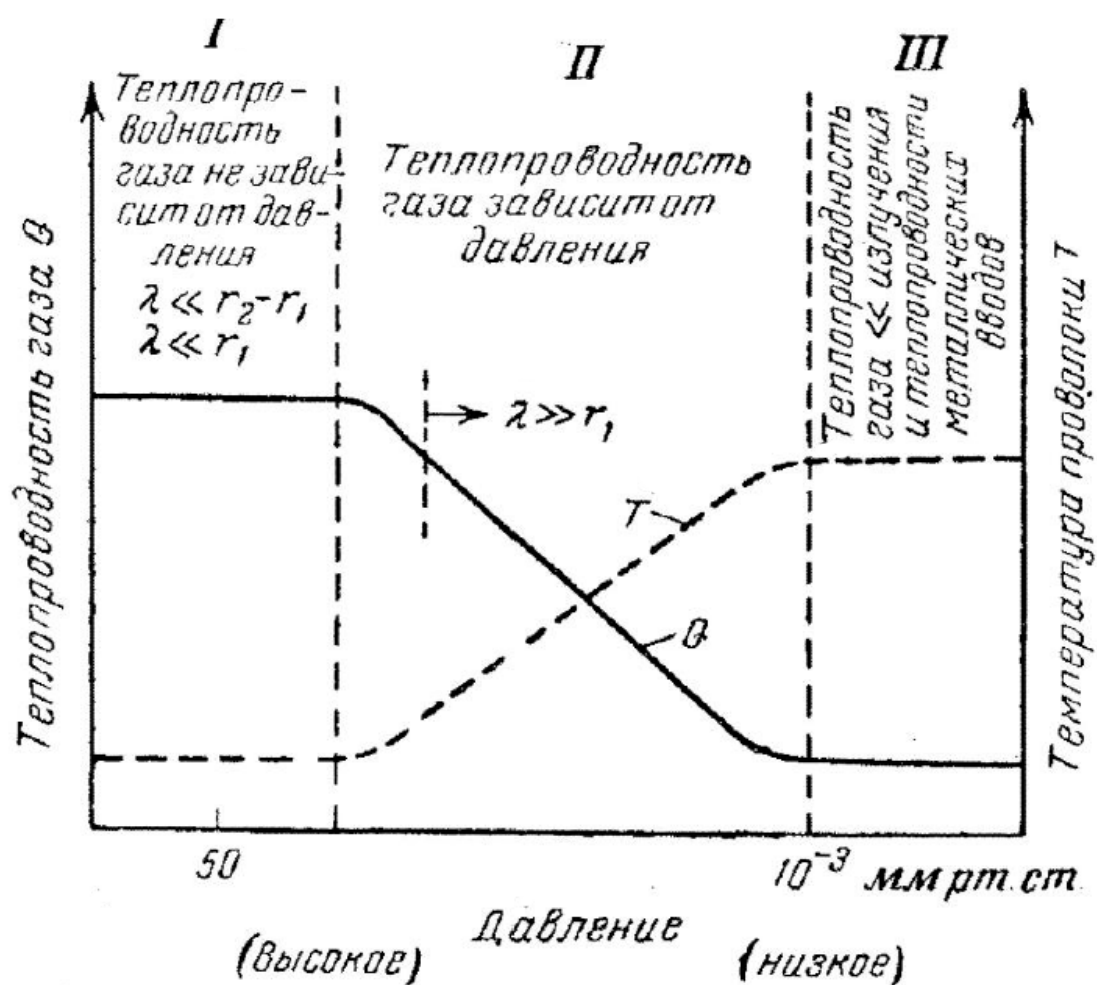


Рис. 54. Теплопроводность газа Q (сплошная линия) и температура T нагреваемой постоянным током проволоки (штриховая линия) в зависимости от давления газа. λ – длина свободного пробега молекул; r_1 – радиус нити накала; r_2 – радиус баллона вакуумметра [3, с. 117]

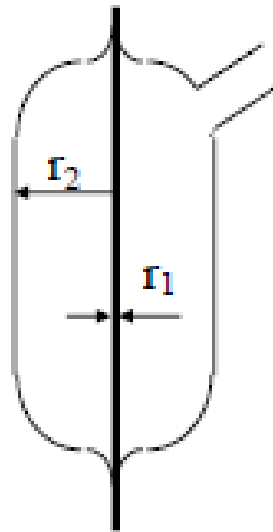


Рис. 55. Простейшая схема теплового вакуумметра: баллон радиуса r_2 и нить накала радиуса r_1 [13, с. 214]

Общая схема простейшего теплового вакуумметра показана на рис. 55. Баллон датчика вакуумметра (например – стеклянный) соединяется с вакуумной системой. В баллоне помещается нить накала, электрические выводы которой вакуумплотно проходят через стенки баллона наружу и присоединяются к блоку управления и измерения. Площадь нагретой нити накала значительно меньше внутренней поверхности холодного баллона, поэтому считается, что баллон с основной массой внутреннего газа имеют низкую температуру (например – комнатную), а сама нить накала – повышенную. Если теплопроводность газа зависит от давления, то нить, нагреваемая электрическим током, будет охлаждаться, передавая через газ разную мощность. Таким образом, теплоэлектрические вакуумметры являются приборами косвенного действия, то есть – вторичными; с электрическим выходным сигналом. Они требуют градуировки, так как невозможно найти теоретически точное соотношение между электрическими параметрами и измеряемым давлением.

На практике тонкая металлическая (в подавляющем большинстве случаев) нить накала может иметь сечение различной формы – круглое, тонкой ленты, квадратное или какое-то другое. Она может представ-

лять собой микропровод, напылённую на подложку плёнку, или – отдельный электронный компонент (например – термистор). Баллон может быть цилиндрическим (стеклянным или металлическим), иметь какую-то другую форму, или – быть открытым (что по факту означает отсутствие баллона). В последнем случае, например, чувствительный элемент на фланце может в открытом виде вставляться внутрь вакуумной камеры; теплообмен, по факту, происходит между нитью накала и всей вакуумной системой. Таким образом, баллон может иметь температуру окружающей среды (обозначим T_{σ}); в этом случае показания вакуумметра будут зависеть от этой температуры. Закрытый баллон может термостатироваться при температуре, несколько более высокой, чем комнатная (например, 30°C или 35°C). Нить накала может иметь температуру (T_n), скажем, 200°C (рабочая температура датчиков ПМТ-6-3), или какую-то другую.

Теплопередача между нитью накала и баллоном подразделяется на 1) **теплопроводность** и **конвекцию** через газ (полезная мощность W_{mk}), 2) **излучение** нити накала (паразитная мощность W_u), 3) **кондуктивный теплоотвод** через вводы нити накала (паразитная мощность W_g). Кроме того, к паразитным потерям можно отнести теплоотвод через газ в местах датчика со сложной геометрией. Например, если нить накала расположена по оси цилиндрического баллона (рис. 55), то теплоотвод на его торцах (то есть – сверху и снизу), трудно рассчитать. Положение усугубится, если на торцах расположены патрубки соединения с вакуумной системой. Если к датчику вакуумметра подводится электрическая мощность W , то уравнение теплового баланса будет выглядеть так:

$$W = W_{mk} + W_u + W_g. \quad (12)$$

Мощность W можно представить в виде:

$$W = I^2 R_0 (1 + \alpha (T_n - T_{\sigma})) = \frac{U^2}{R_0} \cdot \frac{1}{(1 + \alpha (T_n - T_{\sigma}))}, \quad (13)$$

где I и U – ток и напряжение на вводах нити накала, R_0 – сопротивление материала нагревательного элемента при комнатной температуре, α – температурный коэффициент сопротивления материала нагревательного элемента. Все эти параметры известны из справочников или легко измеряемы.

Мощность W_{mk} можно рассчитать в зависимости от механизма теплоотвода через газ: молекулярный режим, вязкостный или – промежуточный. Это определяется степенью вакуума. Все три режима имеют соответствующий диапазон критерия Кнудсена

$$K_n = \bar{\lambda}/d, \quad (14)$$

где $\bar{\lambda}$ – средняя длина свободного пробега молекул, d – характеристический размер баллона. Конвективный теплообмен в газе под действием силы тяжести заметно проявляется при давлениях выше $10^3 \div 10^4 \text{ Па}$. В работе [19] предложена модель обобщённой конвективно-кондуктивной теплопередачи, по которой мощность W_{mk} представляется как

$$W_{mk} = aF(T_n - T_o), \quad (15)$$

где a – конвективно-кондуктивный коэффициент, учитывающий неполноту энергетического обмена в условиях разных режимов молекулярного взаимодействия; F – площадь нагретой поверхности чувствительного элемента. Для цилиндрической нити (или проволоки):

$$W_{mk} = \pi adl(T_n - T_o) \quad (16)$$

где d и l – диаметр и длина проволоки.

Мощность W_{mk} при молекулярном режиме линейно растёт с давлением, при вязкостном – растёт незначительно и нелинейно. Как видно из (15), W_{mk} пропорциональна F и $(T_n - T_o)$; также она зависит от природы газа.

Мощность излучения нагретой нити W_u по закону Стефана-Больцмана составит:

$$W_u = F(\alpha_n T_n^4 - \alpha_o T_o^4), \quad (17)$$

для цилиндра:

$$W_u = \pi dl(\alpha_n T_n^4 - \alpha_o T_o^4), \quad (18)$$

где α_n и α_o – коэффициенты лучистого теплообмена для поверхности нити и поверхности баллона, они равны:

$$\alpha_n = C_0 \varepsilon_n \text{ и } \alpha_o = C_0 \varepsilon_o, \quad (19)$$

здесь C_0 – константа Стефана-Больцмана; ε_n и ε_o – интегральная степень черноты поверхностей нити и баллона. Тогда из (17) – (19) имеем:

$$W_u = C_0 F (\varepsilon_n T_n^4 - \varepsilon_o T_o^4), \quad (20)$$

для цилиндра:

$$W_u = \pi d l C_0 (\varepsilon_n T_n^4 - \varepsilon_o T_o^4), \quad (21)$$

Мощность излучения W_u практически не зависит от давления газа в камере. Для снижения этого паразитного эффекта нужно уменьшать F , ε_n и T_n , однако последний параметр должен быть достаточно высок для получения хорошей чувствительности; речь может идти только об оптимальном значении.

Поток тепла в единицу времени через электрические вводы W_o можно выразить гиперболической зависимостью [19]:

$$W_o = I^2 R_0 (1 + \alpha (T_n - T_o)) \frac{th(\beta l)}{\beta l}, \quad (22)$$

где

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{\lambda_n d} \left(a + \frac{\alpha_n T_n^4 - \alpha_o T_o^4}{T_n - T_o} \right)}, \quad (23)$$

здесь λ_n – коэффициент теплопроводности материала нити накала.

Таким образом, W_o зависит от природы и размеров нити накала (l , d и λ_n) и пропорциональна мощности электрического тока через неё.

Для получения максимальной чувствительности теплового датчика нужно стремиться выполнить условие

$$W_{mk} \gg W_u + W_o. \quad (24)$$

Многие параметры, входящие в полученные уравнения, неизвестны или нестабильны во времени, поэтому, как уже отмечалось, использовать эти уравнения для точного расчёта измеряемого давления невозможно.

С другой стороны, этот теоретический анализ позволяет делать предварительные расчёты параметров вакуумметров и получить ряд ценных практических рекомендаций для их конструирования. Так из формул следует, что нужно стремиться повышать значения α_o и ε_o и понижать значения ε_n и T_o . Как уже отмечалось, F должна быть оптимизирована из соображений увеличения мощности теплопроводно-

сти и уменьшения мощности излучения. В этом плане обычно стремятся увеличить l и уменьшить d нити накала. также должна быть оптимизирована температура T_n . Термостабилизация баллона при температуре, несколько более высокой, чем комнатная, очень хорошо сказывается на увеличении точности и стабильности показаний, но вызывает некоторые нежелательные эффекты, такие, как термическая транспирация. Последний эффект, впрочем, может быть сведён на нет конструктивно. Снижение тепловых потерь через электрические вводы можно получить, уменьшая диаметр проволоки, или – применением тонкоплёночных элементов. Как видно из полученных формул, температурный режим теплового датчика вакуума не зависит от его размеров. Наличие в системе неустановившихся процессов теплопереноса будет искажать показания вакуумметра.

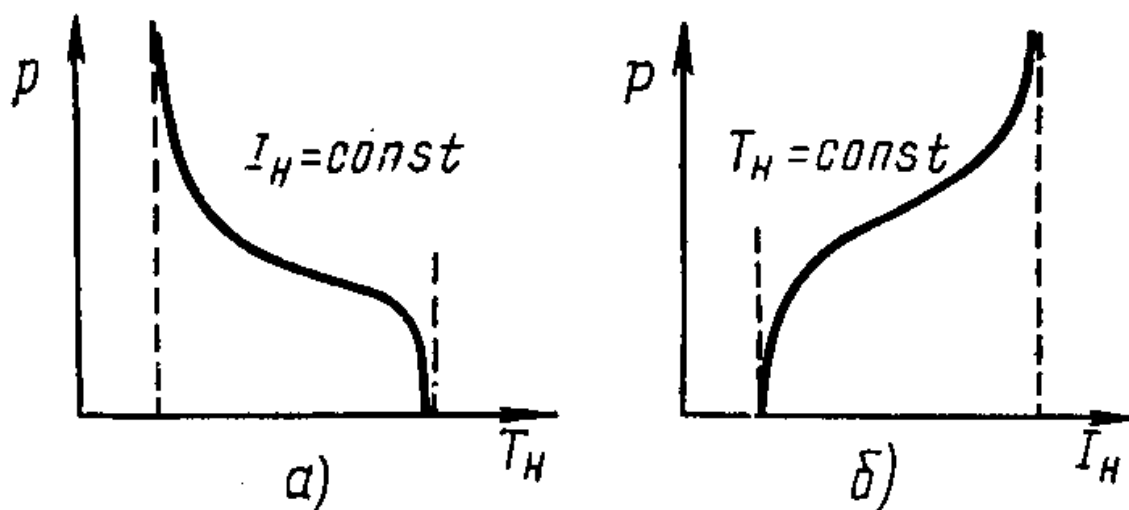


Рис. 56. Градуировочные кривые теплоэлектрического преобразователя: а – при постоянном токе накала, б – при постоянной температуре нити [12, с. 109]

В практике вакуумметрии тепловых вакуумметров применяется две основных схемы их работы:

1. **Режим постоянного тока накала.** Электрическая схема питания манометрического преобразователя обеспечивает протекание через нить накала одного и того же, заданного, тока. При изменении давления в системе меняется мощность теплоотвода и, следовательно, –

температура нити. Таким образом, выходным параметром будет служить температура нити, измеренная каким-то методом с электрическим выходом. Чаще всего для этого служит термопара, горячий спай которой приварен к самой нити. Такие **вакуумметры** называются **термопарными**. Типичная градуировочная кривая представлена на рис. 56а. Возможен также режим измерения температуры нити по её сопротивлению, то есть – без термопары.

2. Режим постоянной температуры нити. Электрическая схема преобразователя непосредственно измеряет температуру нити, которая строго задана и должна поддерживаться, с помощью мостовой схемы. При возникновении сигнала разбаланса схема автоматически меняет электрическую мощность путём корректировки напряжения питания нити. Последний параметр и является выходным электрическим сигналом датчика. Такие приборы называются **теплоэлектрическими** (или терморезисторными) **вакуумметрами сопротивления**. Их типичная градуировочная кривая представлена на рис. 56б (на рисунке представлен ток накала, но более оптимальный параметр – связанное с ним напряжение питания нити).

Диапазон измерения термопарных вакуумметров сдвинут в сторону более низких давлений.

v10 § 2. Термопарные вакуумметры

Термопарные вакуумметры состоят из манометрического преобразователя (датчика), который подсоединяется к вакуумной камере, в которой измеряется давление, и электронного измерительного блока, который осуществляет управление электрическим режимом измерений и преобразует выходной электрический сигнал (термо-э.д.с. термопары) в единицы давления. Последнее может отсутствовать; в этом случае необходимо пользоваться градуировочными кривыми. Чаще всего эти вакуумметры используются как индикаторы форвакуума, так как точность измерений у них невысока – несколько десятков процентов.

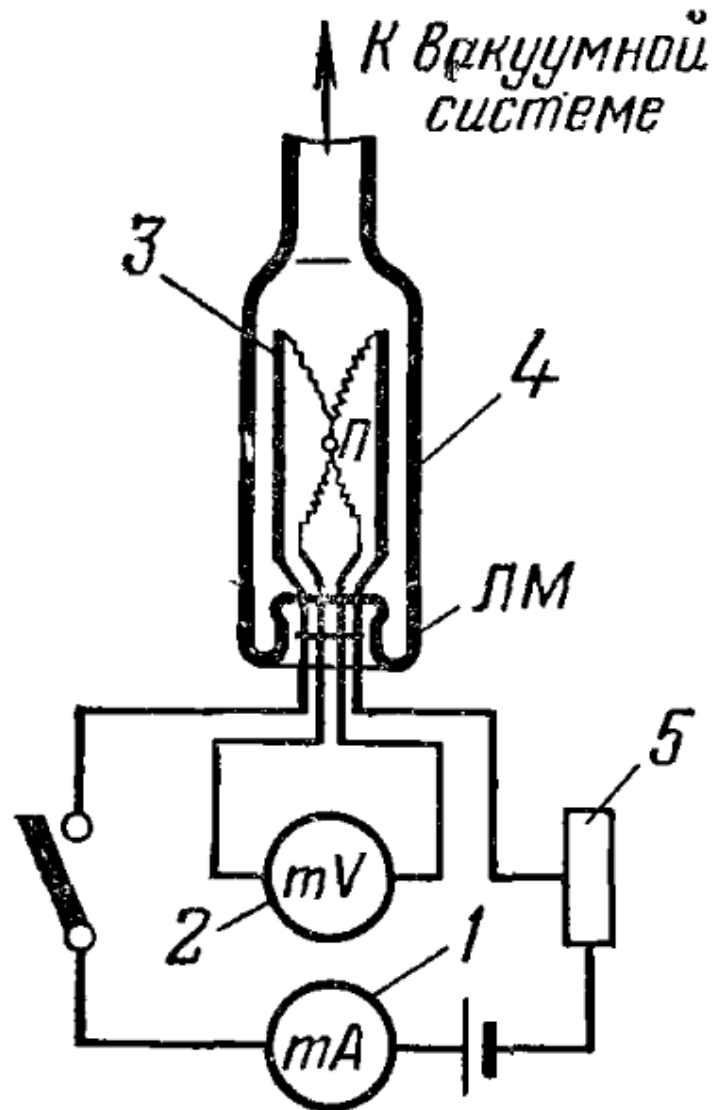


Рис. 57. Термопарный манометр и упрощенная схема измерительного блока. ПМТ-2 (ЛМ-2) — манометрическая лампа; 1 — миллиамперметр для измерения тока нагрева нити накала; 2 — милливольтметр для измерения давления по термо-э. д. с. термопары; 3 — нить накала; 4 — термопара (спай в точке П приварен к нити); 5 — реостат (потенциометр) [2, с. 194]

На рис. 57 показана принципиальная схема термопарного вакуумметра (на примере ПМТ-2). Баллоном является цилиндрическая часть стеклянной лампы, которая через патрубок присоединяется к вакуумной системе. Снизу в стекло впаиваются четыре электрических ввода; два контакта идут на нить нагрева, а два являются выводами тер-

мопары. Последняя приварена к середине нити накала. Блок управления состоит из цепи нагрева с реостатом 5; мощность контролируется миллиамперметром 1 (постоянный ток накала). Температура нити накала измеряется милливольтметром 2 (выходной электрический сигнал).

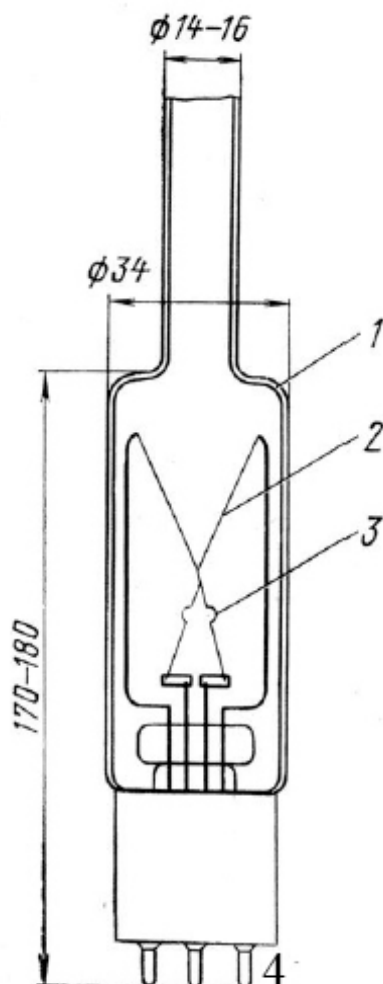


Рис. 58. Конструкция термопарного преобразователя ПМТ-2: 1 – стеклянная колба; 2 – нагреваемая нить; 3 – термопара; 4 – вакуумплотные электрические вводы [3, с. 118]

Более подробно устройство вакуумной лампы ПМТ-2 показано на рис. 58. Электрические вводы 4 внутри лампы 1 впаяны в стеклянный держатель и неподвижно зафиксированы. Крайние вводы идут вверх (толстая проволока); к ним приварена нить накала 2 из технической платины (диаметр 0,1 мм), которая в середине своей свисает вниз,

где к ней привариваются электроды термопары 3 (хромель-копель). Вводы для термопары находятся в середине стеклянного держателя. Электрические вводы 4 представляют собой штырьковые контакты, которые зафиксированы в цоколе лампы. Цоколь вставляется в соединительный кабель, идущий на блок управления.

Внешний вид лампы ПМТ-2 представлен на рис. 59 (см. также рис. 60). На конце присоединительной трубки невоскрятой откачанной лампы находится секция с геттером. Перед использованием невоскрятая лампа подключается к измерительному блоку и определяется рабочий ток, индивидуальный для каждой лампы. Затем лампа вскрывается и подключается к вакуумной системе.

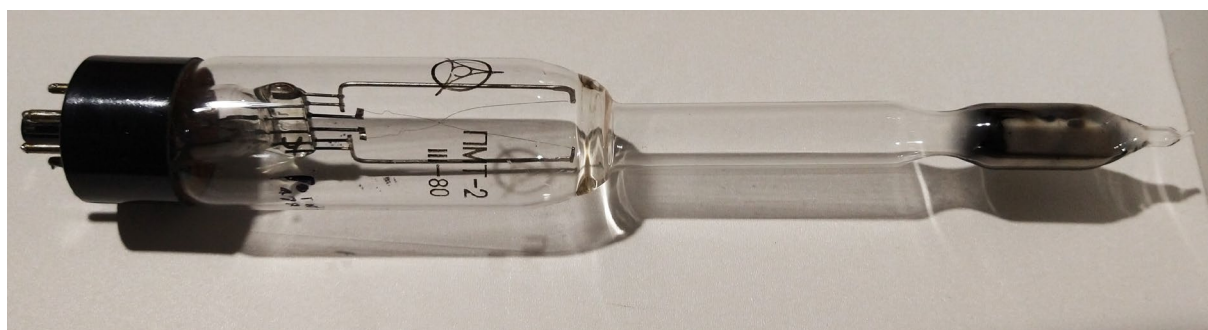


Рис. 59. Манометрический преобразователь ПМТ-2 [фото автора]

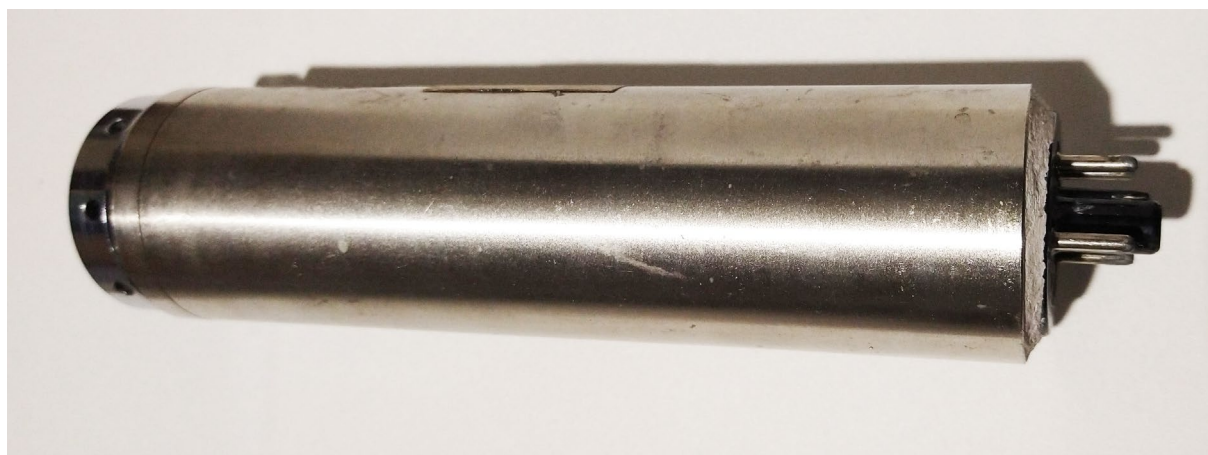


Рис. 60. Манометрический преобразователь ПМТ-2, адаптированный под металлическую вакуумную установку [фото автора]

Аналогичный преобразователь, рассчитанный на металлические вакуумные установки, – ПМТ-4М, показан на рис. 61. Нагревательная

проволока этого датчика изготовлена из никеля, а используемая термопара – хромель-алюмелевая. Эта лампа имеет несколько более худшие характеристики, чем ПМТ-2. Последняя также может применяться в металлических вакуумных установках через грибковые уплотнения или посредством спайки стекла с коваровой трубкой. На рис. 60 показана лампа ПМТ-2, вставленная на герметике в металлический цилиндр, который может подключаться к металлической вакуумной установке через фланцевое соединение.



Рис. 61. Манометрический преобразователь ПМТ-4М [фото автора]

Описанными датчиками комплектовали долгое время выпускавшиеся в Советском Союзе термопарные вакуумметры ВТ-2А (рис. 62), ВТ-3 (рис. 63) и комбинированные ионизационно-термопарные ВИТ-1А (рис. 64), ВИТ-2 (рис. 65) и ВИТ-3 (рис. 66). Эти приборы имели ручное регулирование тока накала и контроля режима электропитания датчика, а также имели ряд других недостатков. Но те же самые преобразователи входят в комплект более совершенного вакуумметра ВТ-6 (рис. 67), в котором указанные недостатки были устранены, а также – в комплекты современных вакуумметров ВТ-6 и цифрового ВТ-12 (рис. 68). Последние приборы значительно удобнее в работе, однако точность измерений у них не улучшилась и составляет те же несколько десятков процентов.

Типовые градуировочные кривые (по воздуху) преобразователя ПМТ-2 приведены на рис. 69-2, а преобразователя ПМТ-4М – на рис. 70.



Рис. 62. Термопарный вакуумметр ВТ-2А

[https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2F15.img.avito.st%2Fimage%2F1%2FLtW1g7a_gjzDJnA65ds58hsgdYDL4IbOByCAOg0mgDwBZg&lr=192&pos=3&rpt=simage&source=serp&text=вт-2а%20вакуумметр]



Рис. 63. Термопарный вакуумметр ВТ-3

[https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fstatic.qrz.su%2Fclassifieds%2F2048x2048%2F57180dbc3e5c9.jpg&lr=192&pos=2&rpt=simage&source=serp&text=вт-2а%20вакуумметр]



Рис. 64. Вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-1А
 [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fstudfile.net%2Fhtml%2F2706%2F30%2Fhtml_iMg2XaDLRu.zxKx%2Fimg-tVJBvl.jpg&lr=192&pos=4&rpt=simage&source=serp&text=ВИТ-1А%20вакуумметр]



Рис. 65. Вакуумметр ионизационно-термопарный ВИТ-2
 [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fstatic.qrz.su%2Fclassifieds%2F2048x2048%2F57180da76bbf4.jpg&lr=192&pos=4&rpt=simage&source=serp&text=ВИТ-2а%20вакуумметр]



Вакуумметр ВИТ 3 Мерадат

Рис. 66. Вакуумметр ВИТ-3 Мерадат
 [<https://vacuumequipment.ru/blog/vakuummetry-vit-ionizacionno-termoparnye-vit-1-vit-2-vit-3/>]



Рис. 67. Термопарный вакуумметр ВТ-6
 [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fwww.r-t-i.ru%2Fi%2Fo%2Fvt-6.jpg&lr=192&pos=0&rpt=simage&source=serp&text=ВТ-6%20вакуумметр]



Рис. 68. Термопарный вакуумметр ВТ-12
 [https://yandex.ru/video/preview/17053004881107674405]

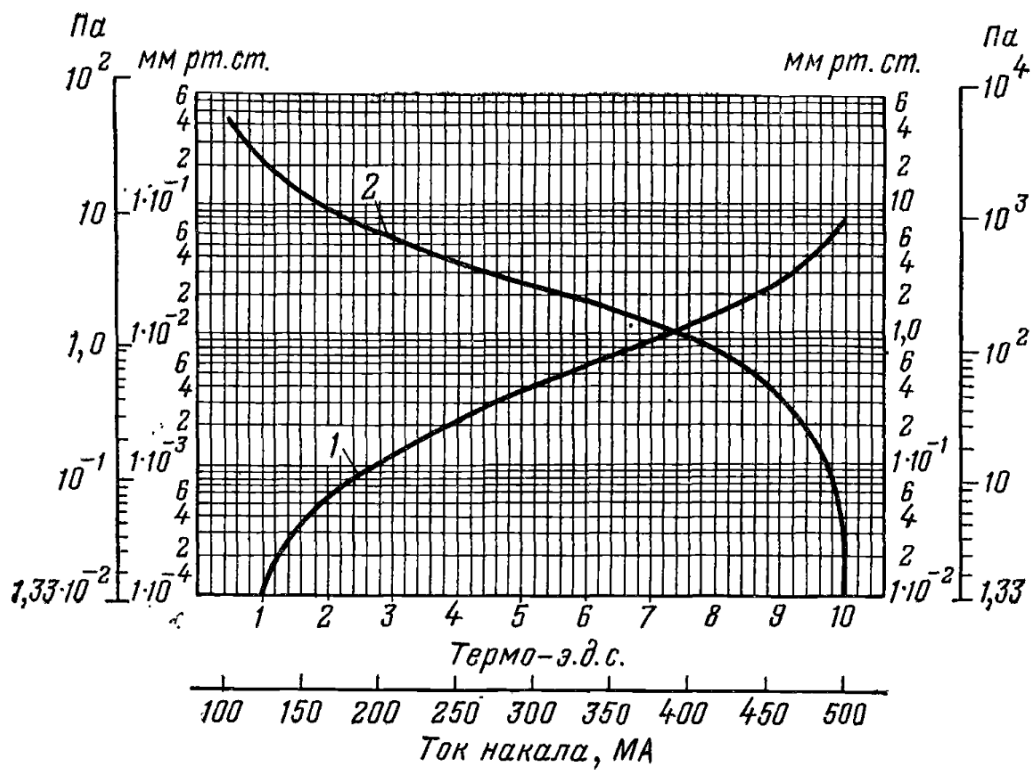


Рис. 69. Градуировочные кривые для термопарного манометра ПМТ-2 по воздуху. 1 – градуировочная кривая для измерения давления в диапазоне $6,65 \cdot 10^2 \div 66,5 \text{ Па}$; ($5 \div 5 \cdot 10^{-1} \text{ Торр}$.); 2 – градуировочная кривая для измерения давления в диапазоне $66,5 \div 1,33 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$ ($5 \cdot 10^{-1} \div 1 \cdot 10^{-3} \text{ Торр}$) [2, с. 195]

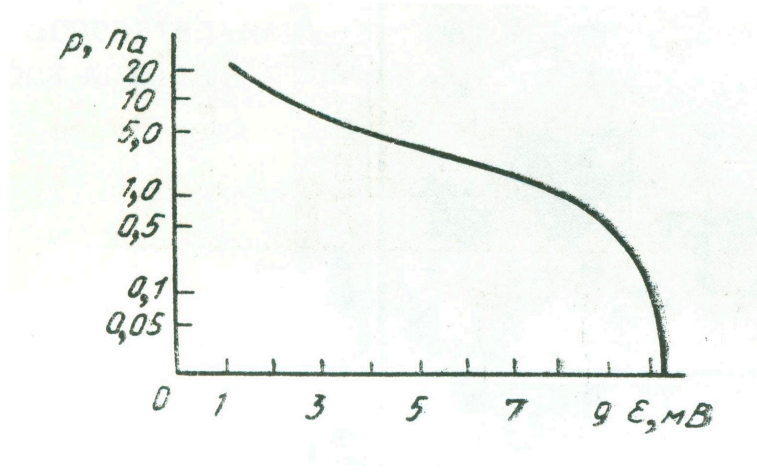


Рис. 70. Градуировочная кривая для термопарного манометра ПМТ-4М по воздуху [4, с. 197]

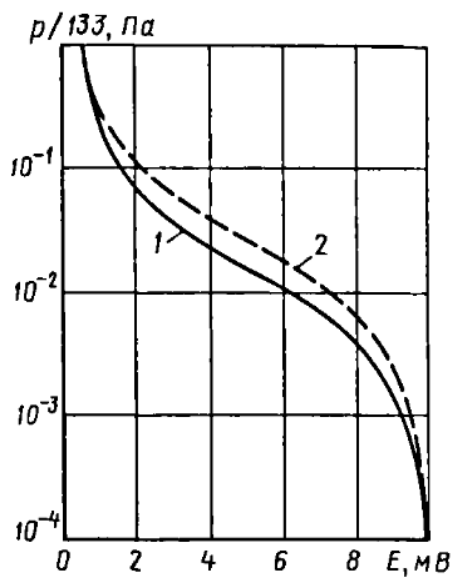


Рис. 71. Градуировочные характеристики термопарного преобразователя ПМТ-2, работающего в режиме постоянного тока: 1 – для паров воды; 2 – для азота [9, с. 534]

Таблица 9. Относительная чувствительность преобразователя ПМТ-2 по различным газам [9, с. 533]

Газ	Воздух	He	Ne	Ar	Kr	Xe	H ₂	O ₂
q	1,00	0,89	0,76	0,64	0,43	0,45	1,49	1,30
Газ	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	H ₂ S	
q	1,03	1,06	1,64	1,67	1,16	1,26	1,41	

Таблица 10. Метрологические характеристики термометров [1, с. 37]

Тип, марка вакуумметра	Тип, марка преобразователя	Диапазон измерений, Па	Диапазон индикации, Па	Форма отсчета давления	Основная относительная погрешность, %	Наработка на отказ, ч
ВТ-2А (ВТ-2АП)	ПМТ-2 ПМТ-4М	1—10 10 ⁻¹ —20	10 ⁻¹ —10	По типовым градуировочным кривым	±30 —70 +250	600
ВТ-3	ПМТ-2 ПМТ-4М	10 ⁻¹ —7·10 ² —	10 ⁻¹ —70	То же	±30 (10 ⁻¹ —70 Па) ±50 (70—7·10 ² Па)	1000 1000
ВИТ-2 (ВИТ-2П) — термометрическая часть	ПМТ-2 ПМТ-4М	—	10 ⁻¹ —20	»	—	800
ВИТ-3 — термометрическая часть	ПМТ-2 ПМТ-4М	—	10 ⁻¹ —10	»	—	—
ВИЦ-АБ — термометрическая часть	ПМТ-2	—	10 ⁻¹ —10	»	—	—
ВТ-6	ПМТ-2	10 ⁻¹ —7·10 ²	—	Непосредственный отсчет	±30 (10 ⁻¹ —10 ² Па) ±50 (10 ² —7·10 ² Па)	5000
ВТЦ-1	ПМТ-4М ПДТ-8 ПДТ-9	10 ⁻¹ —10 10 ⁻² —10 ² 10 ⁻³ —10	—	То же	±60 ±(15—20) ±(15—25)	1500

Для расширения диапазона измерений в сторону более высоких давлений в вакууметрах ВТ-3 и ВТ-6 введён режим работы при постоянной температуре нити. При этом поддерживается постоянной термо-э.д.с. термопары. Соответствующая градуировочная кривая показана на рис. 69-1.

Показания термопарных манометров зависят от природы газа (см., например, рис. 71). Относительная чувствительность q для многих газов приведена в справочниках (см. табл. 8) или может быть рассчитана по формулам [9, с. 533]. Характеристики термопарных вакуумметров приведены в табл. 10.

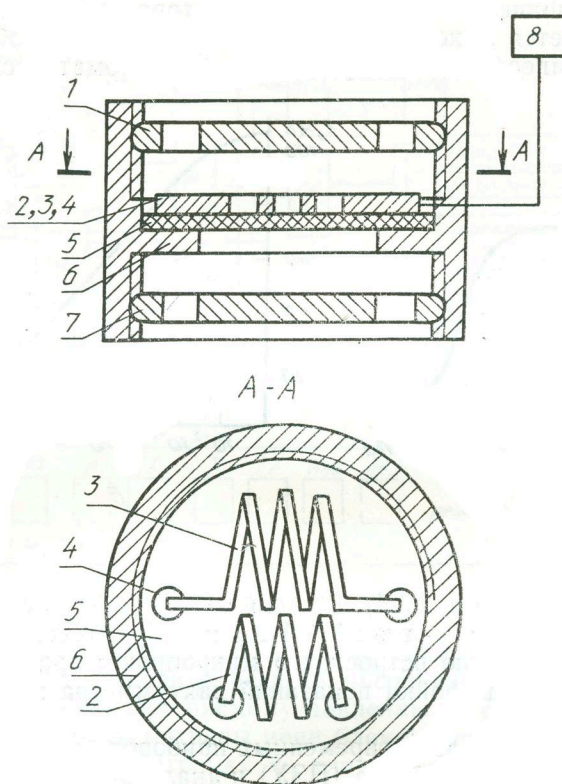


Рис. 72. Схема полупроводниковых планарных преобразователей ПДТ-8 и ПДТ-9. 1, 7 – зеркальные теплопроводные экраны; 2 – нагревательная термопара; 3 – измерительная термопара; 4 – контактные площадки; 5 – диэлектрическая пластина; 6 – массивное основание; 8 – электронный измерительный блок [1, с. 39]

Высококочувствительные термопарные вакуумметры были разработаны на основе технологии микроэлектроники и полупроводников [20]. Из полуметаллов на основе сплавов висмута, теллура, олова и

сурьмы можно изготовить батареи термопар, суммарная термо-э.д.с. которых на порядок величины больше обычных значений — $> 100 \text{ мкВ/К}$. В разработанных датчиках нить накала также представляла собой термопару, в которой нагревание происходило за счёт джоулева тепла и эффекта Пельтье. Термический контакт двух батарей термопар осуществлялся на зеркальной медной фольге, что снижало потери мощности на излучение и через вводы.

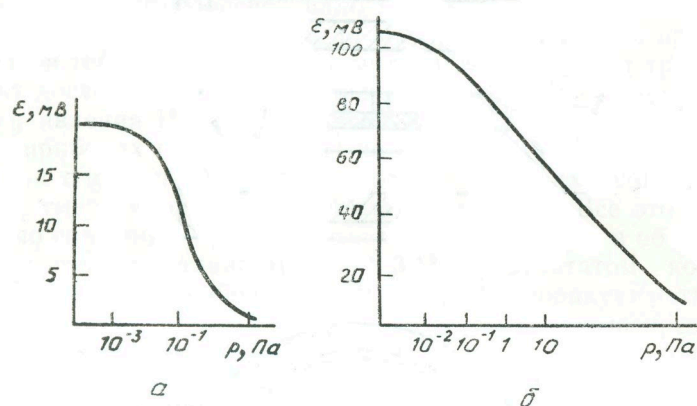


Рис. 73. Градуировочная характеристика преобразователя ПДТ-9 (а) и ПТИД-60 (б) [1, с. 40]

В работе [21] были предложены преобразователи ПДТ-8 и ПДТ-9 на основе планарных технологий микроэлектроники, в которых были устранены некоторые недостатки рассмотренных термопарных вакуумметров (инерционность, малая надёжность). Их принципиальная схема показана на рис. 72. В них на массивном основании 6 крепится тонкая диэлектрическая пластина 5, имеющая малую теплоёмкость. На ней вакуумным напылением нанесены плёнки термопар, нагревательной и измерительной. На основании 6 также крепятся зеркально полированные теплопроводные экраны 1 и 7. Они служат для изменения теплового режима датчика, что влияет на его чувствительность. Действие измеряемого давления приводит к возникновению градиента температур между основанием 6 и пластиной 5, который фиксируется батареями термопар 3. Градуировочная характеристика преобразователя ПДТ-9 показана на рис. 73а, ещё более совершенного датчика ПТИД-60 — на рис. 73б. В последнем датчике используется батарея из 60 термопар.



Рис. 74. Термопарные вакуумметры Agilent 536 и Agilent 531
[<https://vacuum-id.net/catalogue/vakuummeter/agilent-536/>]
[<https://vacuum-id.net/catalogue/vakuummeter/agilent-531/>]



Рис. 75. Термопарный вакуумметр Televac 2A
[<https://vacuum-id.net/catalogue/vakuummeter/televac-2a/>]

Из современных зарубежных преобразователей можно отметить терморезисторные вакуумметры Agilent 536 и Agilent 531 (рис. 74) и вакуумметр Televac 2A.

v11 § 3. Теплоэлектрические вакуумметры сопротивления

Теплоэлектрический вакуумметр сопротивления – это самый распространённый вид тепловых манометров; другие названия – **терморезисторный вакуумметр**, **манометр Пирани**. Он был изобретён немецким физиком итальянского происхождения Марселло Пирани в 1906 году. В подавляющем большинстве случаев он представляет собой цилиндрический баллон, по оси которого натянута металлическая нить накала (рис. 76).



Рис. 76. Датчик Пирани с удалённой частью корпуса
[https://ru.wikipedia.org/wiki/Вакуумметр_Пирани]

Схемы лабораторных вакуумметров показаны на рис. 77 и 78. На рис. 77 (см. также рис. 55) металлическая нить накала натянута вдоль оси стеклянного баллона; электрические вводы проходят через стекло с торцов баллона; манометрическая лампа подключается к вакуумной системе с помощью бокового отвода. В данном случае представлен капиллярный вакуумметр для диапазона $1 \cdot 10^{-2} \div 15 \text{ Torr}$. Диаметр стеклянного капилляра составляет 2 мм, вольфрамовая нить накала –

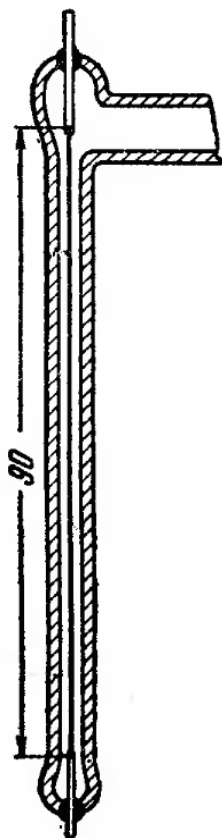


Рис. 77. Схема манометра Пирани с нитью накала, натянутой по оси баллона. Капиллярный вакуумметр для диапазона $1 \cdot 10^{-2} \div 15 \text{ Torr}$ [4, с. 221]

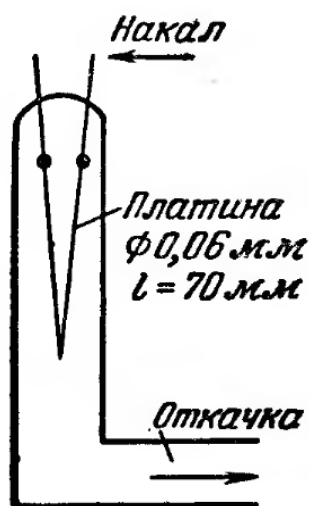


Рис. 78. Схема манометра Пирани с нитью накала, свободно висящей в баллоне. Высокотемпературный манометр до $50 \div 60 \text{ Torr}$ [4, с. 224]

– диаметром 25 мкм. Температура нити – около 70°C . $5 \cdot 10^{-1} \div 1 \cdot 10^{-3}$ Торр. Такая конструкция позволяет существенно сдвинуть обычный диапазон теплоэлектрических вакуумметров сопротивления в сторону более высоких давлений (см. рис. 54). В промышленных вакуумметрах применяются металлические баллоны, на поверхности которых теплообмен происходит более интенсивно, кроме того, они лучше сопрягаются с металлическими вакуумными установками. Электрические вводы, как правило, находятся на одном торце баллона (подводка осуществляется через впаянные изоляторы), нить крепится на специальном металлическом кронштейне (толстая проволока). Подключение к вакуумной системе происходит через патрубок, находящийся на другом торце баллона (см. рис. 76).

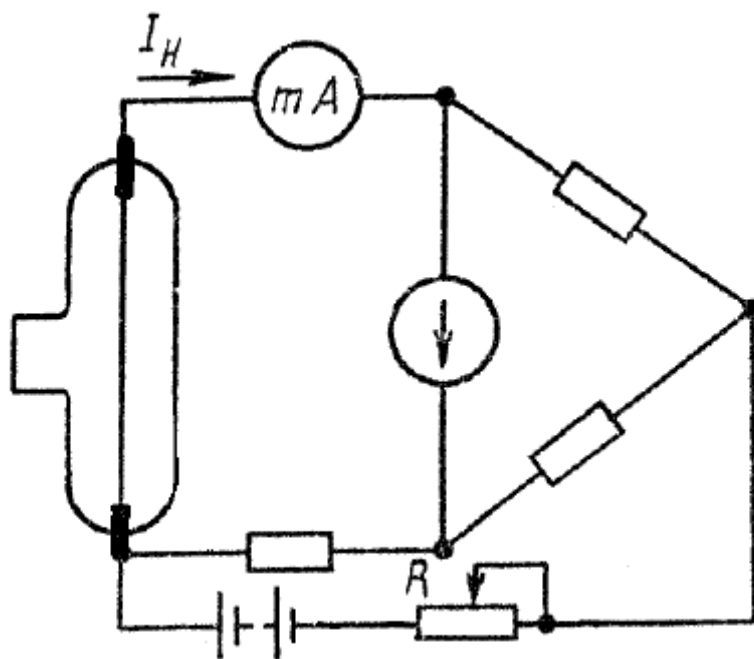


Рис. 79. Принципиальная схема измерений теплоэлектрического вакуумметра сопротивления на основе моста Уитстона [22, с. 77]

На рис. 78 изображён манометр, в котором нить накала свободно висит в баллоне на двух верхних электрических вводах. В настоящее время такая схема практически не используется, так как работа такого датчика будет зависеть от положения лампы в пространстве (наклон баллона) и воспроизводимость результатов будет низкой. Показанный

на этом рисунке датчик работал в режиме повышенной температуры нити (450°C), что позволило получить верхний предел измерения до $50 \div 60 \text{ Torr}$. При этом несомненно осуществлялся конвекционный режим работы датчика (см. ниже).

Наиболее распространённая принципиальная схема измерений теплоэлектрического вакуумметра сопротивления представлена на рис. 79. Нить накала представляет собой одно из плеч моста Уитстона, на котором выставлены постоянные сопротивления, задающие необходимое значение сопротивления нити, соответствующее заданной её температуре. Ток накала I_n , контролируемый миллиамперметром mA несёт чисто информационную функцию. Мост балансируется с помощью потенциометра R изменением напряжения питания моста, а значит, – и падения напряжения на нити накала. Баланс моста контролируется гальванометром. Выходным электрическим сигналом может служить напряжение питания моста или значение сопротивления R ; поскольку вакуумметр Пирани – прибор косвенного действия, его градуировка осуществляется по соответствующему электрическому параметру.



Рис. 80. Вакуумметр теплоэлектрический блокировочный ВТБ-1
[https://www.avito.ru/moskva/oborudovanie_dlya_biznesa/vakuummtr_teploelektricheskiy_blokirovochnyy_vtb-1_2885171176]



Рис. 81. Вакуумметр 13BT3-003

[https://speckip.ru/catalog/preobrazovateli-manometricheskie/item_vakuummetr-13vt3-003/?utm_source=yandex&utm_medium=cpc&utm_campaign=shoppingmk&etext=2202.JzQTYr_xZAqaD001_G3hXDmyCAqqedibDJp-WB5YGJAw7uuCyUXoAieRSDqgW0qr5uJHeizxk7OBzBveaYOQOG9hb nZsc2N0bHZ2emZucm8.cd33a19e35c2b34c553b5f92dbcd1e6f01bfebbc&yclid=17051779525381193727]

В нашей стране долгое время выпускались блокировочные (то есть позволяющие автоматически управлять работой вакуумных систем по каким-то предельным параметрам – значению давления) теплоэлектрические вакуумметры сопротивления ВТБ-1 – рис. 80 (современный дизайн) и 13BT3-003 (бывший ВТБ-2) – рис. 81, которые комплектовались преобразователями ПМТ-6-3.

Вакуумметр ВТБ-1 имеет диапазон измерения давления газа $1 \cdot 10^{-2} \div 30 \text{ Torr}$ и индикации давления в диапазонах $2 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-2} \text{ Torr}$ и $30 \div 750 \text{ Torr}$. Он состоит из блока индикации БИ-3 и теплоэлектрического реле РВТ-1М. Погрешность в диапазоне измерения – от 40% до 60%.

Вакуумметр 13BT3-003 предназначен для измерения давления в диапазоне $1 \cdot 10^{-1} \div 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и считается одним из лучших отечественных вакуумметров. Он имеет аналоговый выход, оснащён блокировочными и сигнализирующими устройствами.

Манометрический преобразователь ПМТ-6-3 (другие модификации – ПМТ-6-3С, ПМТ-6-3НХ, ПМТ-6-3Ф, а также ПМТ-6-3М) кроме рассмотренных вакуумметров входил в комплект многих других приборов. Базовая модель (схема – рис. 82, общий вид – рис. 83) имеет неразборную конструкцию и сделан под грибковое уплотнение.

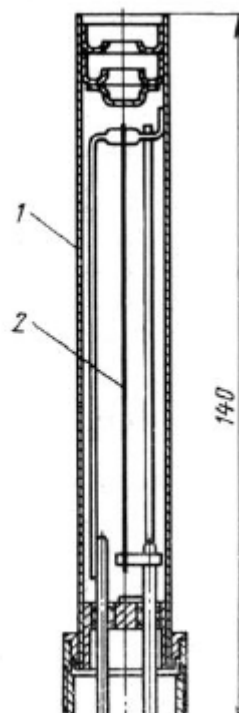


Рис. 82. Схема преобразователя ПМТ-6-3. 1 – баллон; 2 – нить накала [22, с. 77]



Рис. 83. Манометрический преобразователь ПМТ-6-3 [фото автора]

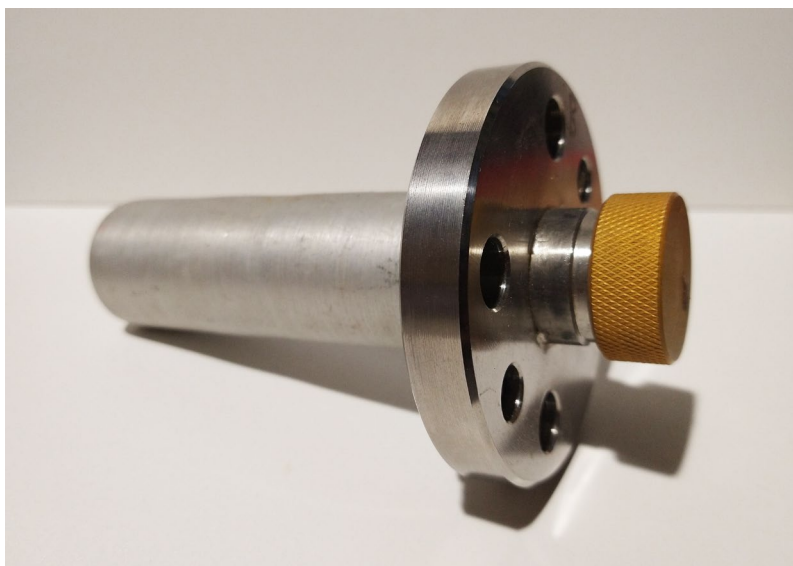
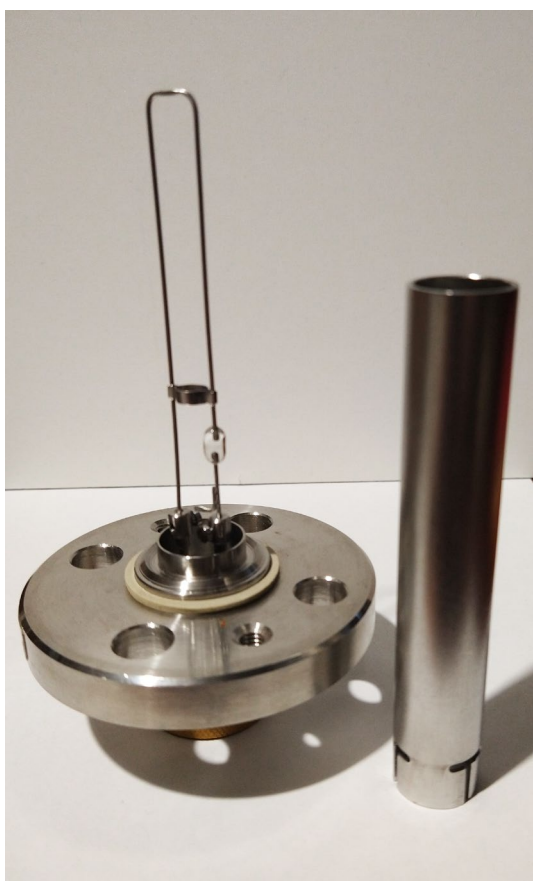


Рис. 84. Манометрический преобразователь ПМТ-6-3Ф в чехле и с заглушкой цоколя [фото автора]



а)



б)

Рис. 85. Манометрический преобразователь ПМТ-6-3Ф. а) – съёмный цилиндрический баллон; б) – сменная запасная нить накала в стеклянном чехле [фото автора]

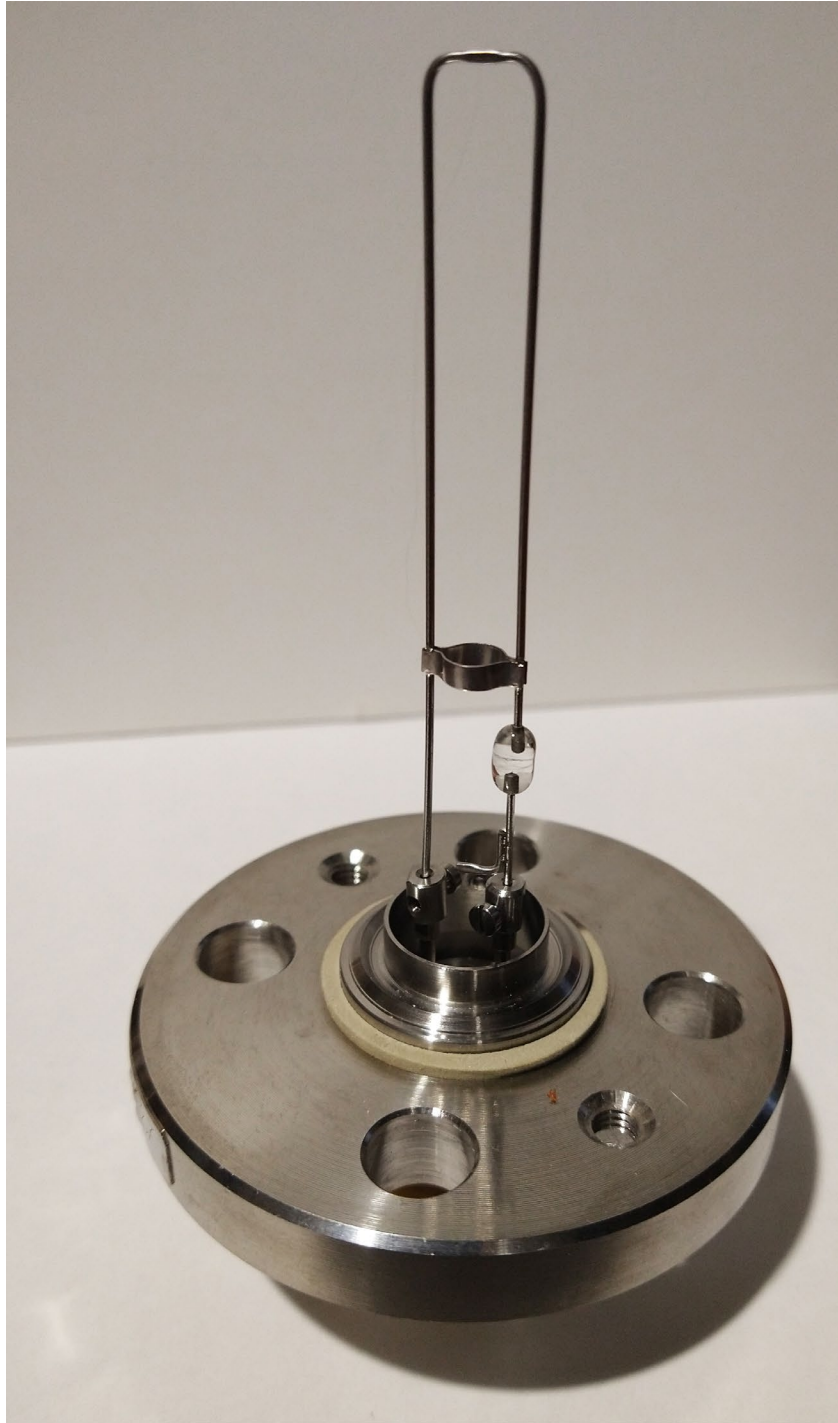


Рис. 86. Манометрический преобразователь ПМТ-6-3Ф в рабочем состоянии (нить накала по оси датчика не видна) [фото автора]

Манометрический преобразователь ПМТ-6-3Ф (рис. 84 – 86) имеет полностью разборную конструкцию. Мощный фланец с кольцевым уплотнением ножевого типа (для прокладки из красной меди) позволяет использовать его в сверхвысоковакуумных установках. При

этом подразумевается, что его работа будет осуществляться на этапе предварительного вакуумирования, или, после сверхвысоковакуумной откачки, – для измерения давления газов в соответствующем диапазоне при проведении каких-то процессов в вакуумной камере. Нить накала (платина, диаметр 0,012 мм, длина 80 мм, номинальное сопротивление при комнатной температуре – $\sim 70 \text{ Ом}$, при рабочей – $\sim 116,5 \text{ Ом}$, рабочая температура $\sim 470 \text{ K}$) приваривается к кронштейну (рис. 85б), который закрепляется винтами на специальных стойках электрических вводов (цоколь лампы – двухконтактный). Таким образом, нить является сменной, что очень удобно, но требует при замене её новой градуировки. Цилиндрический баллон (рис. 85а) также является съёмным, работа датчика может проводиться с ним или без него. В последнем случае в качестве баллона выступает вся вакуумная камера. При любых вариантах, если требуется регламентированная для данного прибора или повышенная точность, датчик следует проградуировать. Типовая градуировочная кривая преобразователя ПМТ-6-3 и его аналога приведена на рис. 87а и, в других единицах и для разных диапазонов – на рис. 88.

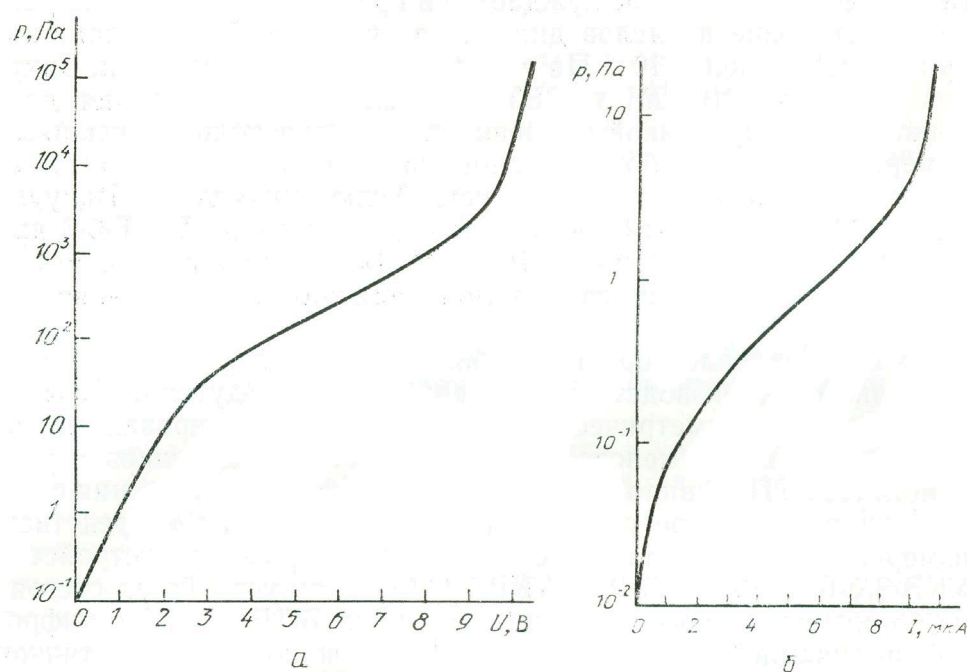


Рис. 87. Типовая градуировочная кривая преобразователей ПМТ-6-3 (а) и ПМТ-16 (б) [1, с. 43]

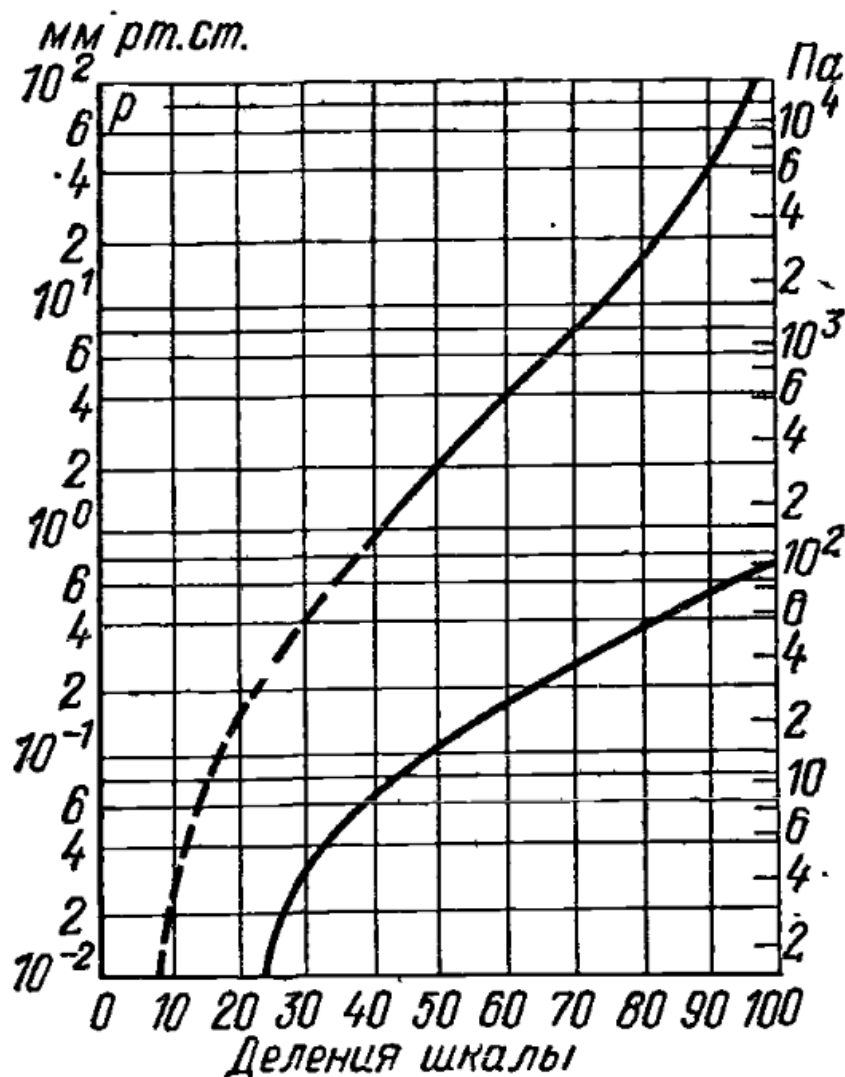


Рис. 88. Типовая градуировочная кривая преобразователя сопротивления ПМТ-6 по воздуху. Верхняя сплошная кривая соответствует диапазону давлений $92 \div 4 \cdot 10^3 \text{ Па}$ ($0,7 \div 30 \text{ Торр}$), нижняя сплошная кривая соответствует диапазону давлений $1,33 \div 92 \text{ Па}$ ($10^{-2} \div 0,7 \text{ Торр}$).) [2, с. 192]

Градуировочная кривая (рис. 87а) соответствует расчётной формуле [23]:

$$U = \sqrt{\frac{2R_t(a_k + a_l)(T - T_k)\pi dl}{1 - \frac{th\beta l}{\beta l}}}, \quad (25)$$

где a_k и a_l – коэффициенты аккомодации и лучистого теплообмена соответственно, см. также (22) и (23).

Преобразователь ПМТ-16 имеет зеркальное (серебряное) покрытие внутренней поверхности стеклянного баллона, что существенно снизило потери на излучение. Нити накала – платиновая диаметром 16 мкм (обычный режим) и золочёная вольфрамовая диаметром 15 мкм (режим постоянного тока нагрева; нижний диапазон до $6 \cdot 10^{-2}$ Па). Типовая градуировочная кривая преобразователя ПМТ-16 для второго режима приведена на рис. 87б.

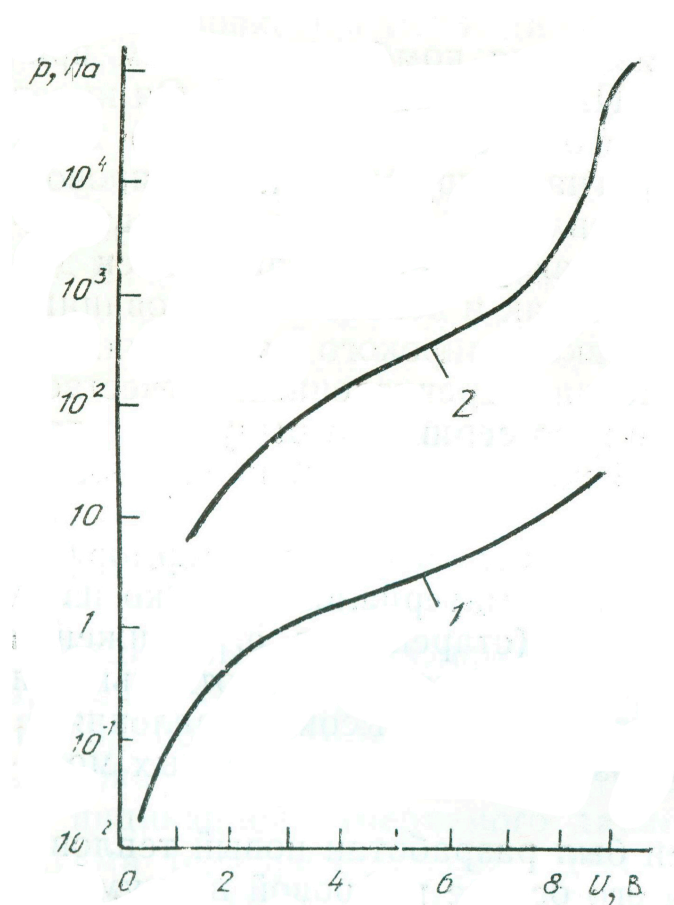


Рис. 89. Типовая градуировочная кривая преобразователя сопротивления ПДТ-20 по воздуху. 1 – термопарная часть – диапазон давлений $4 \cdot 10^{-2} \div 10$ Па, 2 – терморезисторная часть – диапазон давлений $10 \div 10^5$ Па [1, с. 46]

Тепловой преобразователь давления ПДТ-20 совмещает в одном датчике термопарную и терморезисторную часть. Типовая градуировочная кривая этого датчика представлена на рис. 89. Погрешности измерений не превышают 30%. На его основе создан цифровой вакуумметр ВТБ-6.

В работе [5, с. 111 и далее] манометрический преобразователь ПМТ-6-3Ф использовался в лабораторной установке для измерения давления водорода в диапазоне давлений $\sim 0.1 \div 30 \text{ Torr}$. При этом был усовершенствован сам датчик и применена нетривиальная схема измерения.

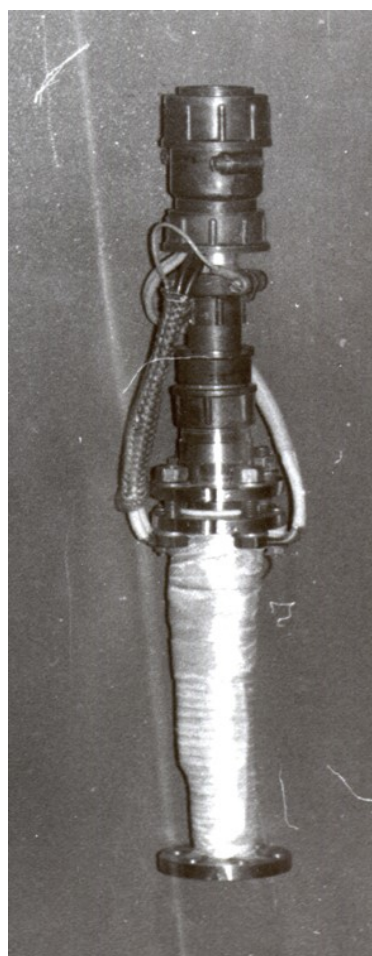


Рис. 90. Общий вид датчика вакуума (теплоэлектрический вакуумметр сопротивления повышенной точности) [5, с. 114]

Как уже отмечалось, погрешности промышленных теплоэлектрических преобразователей сопротивления обычно составляет 30 – 50%,

при индивидуальной градуировке датчиков – 3 – 7% [24]. В рассматриваемом вакуумметре была достигнута бóльшая точность за счёт стабилизации теплового режима работы датчика, совершенствования измерительных схем и схем градуировки, а также за счёт использования расчётных формул для перевода измеряемой величины – падения напряжения на нити накала, – в единицы вакуума с учётом нелинейности этой зависимости.

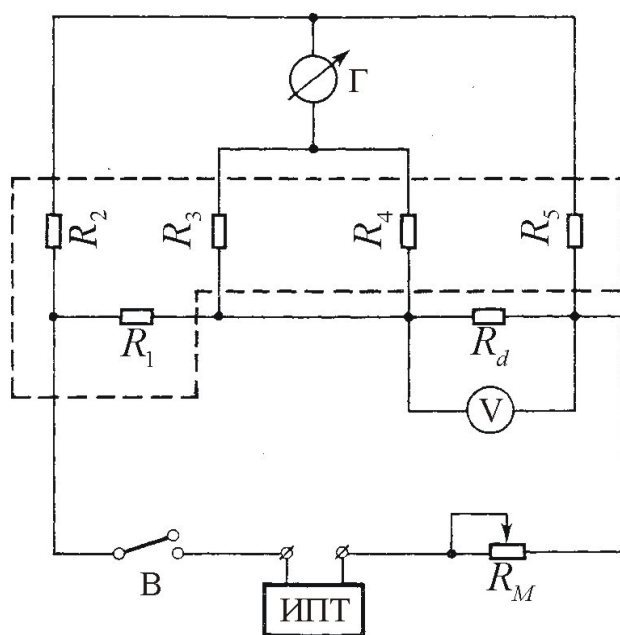


Рис. 91. Измерительная схема двойного моста датчика вакуума. ИПТ – источник постоянного тока; Γ – гальванометр (или электронная схема регулирования); V – вольтметр (например, В7-34А); B – выключатель; R_d – датчик (132,8 Ом); R_1 – задатчик 1,328 Ом; $R_2 - R_5$ – плечи сравнения ($R_2 = R_3 = 100$ Ом, $R_4 = R_5 = 10000$ Ом); R_M – подстроечный реохорд (при электронном регулировании может отсутствовать) [5, с. 113]

Для преобразователя ПМТ-6-3Ф, имеющего съёмный баллон, последний был заменён на толстостенный баллон из нержавеющей стали (диаметр 20 мм, толщина стенки 5 мм), который термостабилизировался при $\sim 40^\circ\text{C}$. Для исключения термической транспирации датчик устанавливался на вакуумной установке горизонтально цоколем вверх. С целью улучшения термостабилизации массивный фланец датчика

стачивался до небольших размеров, причём конструкция оставалась разборной. На баллон через изолятор наматывалась нагревательная спираль и устанавливался платиновый термометр сопротивления; точность поддержания температуры составляла $\pm 0,1 K$. Общий вид датчика вакуума приведён на рис. 90.

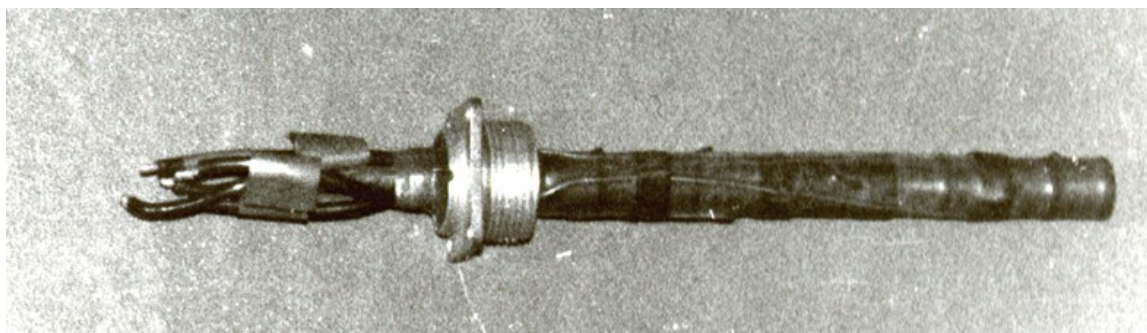


Рис. 92. Общий вид двойного моста [5, с. 114]

Тривиальная измерительная схема в виде моста Уитстона была заменена на двойной мост (принцип работы описан в, например, [25, с. 276-277; 26, с. 231-233]) (рис. 91). Главным преимуществом этого моста является то, что в токовой цепи (сопротивления R_d и R_1) наибольшее сопротивление имеет нить накала (на два порядка) и практически вся электрическая мощность рассеивается на ней; в потенциометрической цепи (сопротивления $R_2 - R_5$) токи малы по определению. Таким образом, измерительная часть моста (на рисунке обведена штриховой линией) – маломощная, что важно в плане повышения стабильности и точности измерений. Все сопротивления этой части – манганиновые; они бифилярно наматывались на массивный металлический стержень (медь $\varnothing 10$ мм), вся конструкция заливалась эпоксидным клеем и помещалась в термостат (рис. 92), причём жгут проводов отходил с одной стороны медного стержня. Все эти меры практически свели к нулю влияние температуры окружающей среды.

Поскольку температура баллона была повышена, для сохранения разности температур баллона и нити, та для последней была повышена до $\sim 250^\circ C$ (что соответствует номиналу $\sim 135 \text{ Ом}$).

Применение двойного моста исключает влияние соединительных проводов, если проводник между сопротивлениями R_d и R_1 выполнен в виде толстого медного провода с минимальным сопротивлением, что

очень важно в плане точности и стабильности измерения сопротивления нити накала.

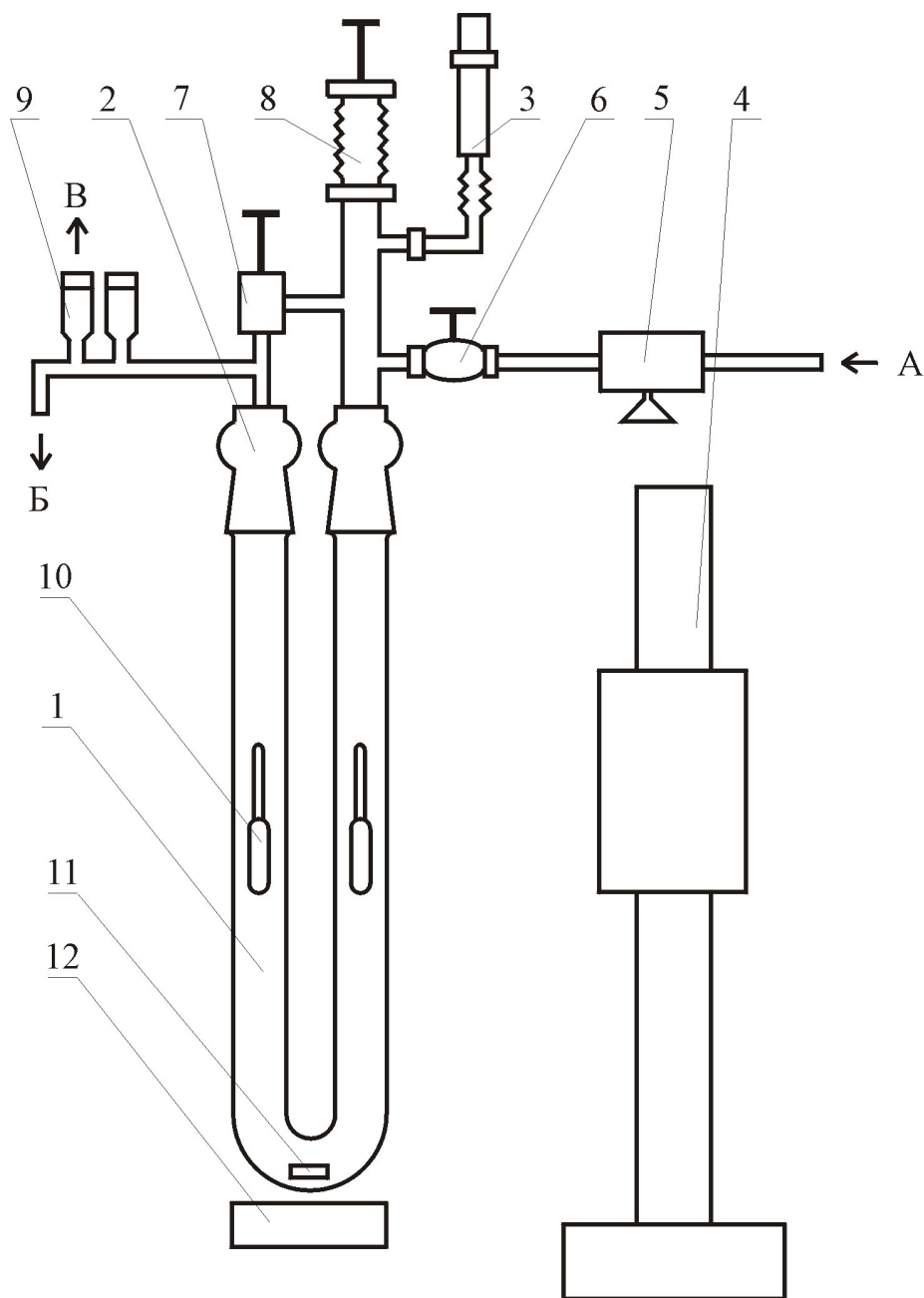


Рис. 93. Схема градуировочной установки датчика термоэлектрического вакуумметра. А – водород от СГС-2; Б – высоковакуумная откачка; В – измерение вакуума. 1 – масляный манометр; 2 – стеклянные шлифы; 3 – датчик; 4 – катетометр КМ-8; 5 – никелевый водородный фильтр; 6, 7 – высоковакуумный кран; 8 – сильфонный регулятор давления; 9 – лампы ПМТ-2 и ПМИ-2; 10 – ареометры; 11 – магнитная мешалка; 12 – устройство перемешивания [5, с. 117]

В дальнейшем была разработана нетривиальная электронная схема регулирования работы датчика с компьютерным управлением, которая автоматически поддерживала заданную температуру нити. При малейшем отклонении от неё сигнал разбаланса с моста поступал на электронную схему, которая повышала или понижала напряжение питания моста. Выходной электрический сигнал – падение напряжения на нити накала, – измерялся цифровым вольтметром В7-34А и фиксировался компьютером.

Для индивидуальной градуировки преобразователя давления был использован U-образный масляный манометр, описанный на с. 23 (глава 1, §2). см. рис. 12 и 13. Схема градуировочной установки представлена на рис. 93.

«Манометр заполнялся вакуумным маслом ВМ-1, перегнанным под вакуумом, причем отгонялась более высококипящая фракция. Перед измерениями масло длительное время дегазировалось под высоким вакуумом $\sim 10^{-5}$ Торр при небольшом нагревании и механическом перемешивании с помощью магнитных якорьков. Небольшие количества газа, оставшиеся после дегазации, прочно удерживаются маслом и не оказывают влияния на градуировку. Плотность масла составила $0,882 \div 0,883$ г/см³, давление насыщенных паров – $\sim 10^{-8}$ Торр.

В колена манометра были помещены ареометры на пределы $0,880 \div 0,940$ г/см³ с ценой деления $0,001$ г/см³ и абсолютной погрешностью $\pm 0,001$ г/см³. Ареометры поверялись пикнометрическим методом. Как показывает расчет, уменьшение архимедовой силы при создании вакуума над выступающей частью ареометра приводит к систематической погрешности, которую в данном случае можно не учитывать. Нами экспериментально установлено, что в пределах чувствительности ареометров плотность масла в двух коленах манометра одинакова. Ареометры реагируют на медленное изменение температуры окружающей среды (1 – 2 деления при изменении температуры на несколько градусов), что делает наши измерения независимыми от этого фактора.

Разность уровней масла в коленах измерялась катетометром КМ-8 с погрешностью $\pm 0,02$ мм, что соответствовало погрешности измерения давления $\sim \pm 0,001$ Торр. Погрешность, вносимая ареометрами, составляла $\pm 0,001$ Торр. Это и определило точность масляного манометра, которая составила около $\pm 0,003$ Торр» [5, с. 115 – 116].

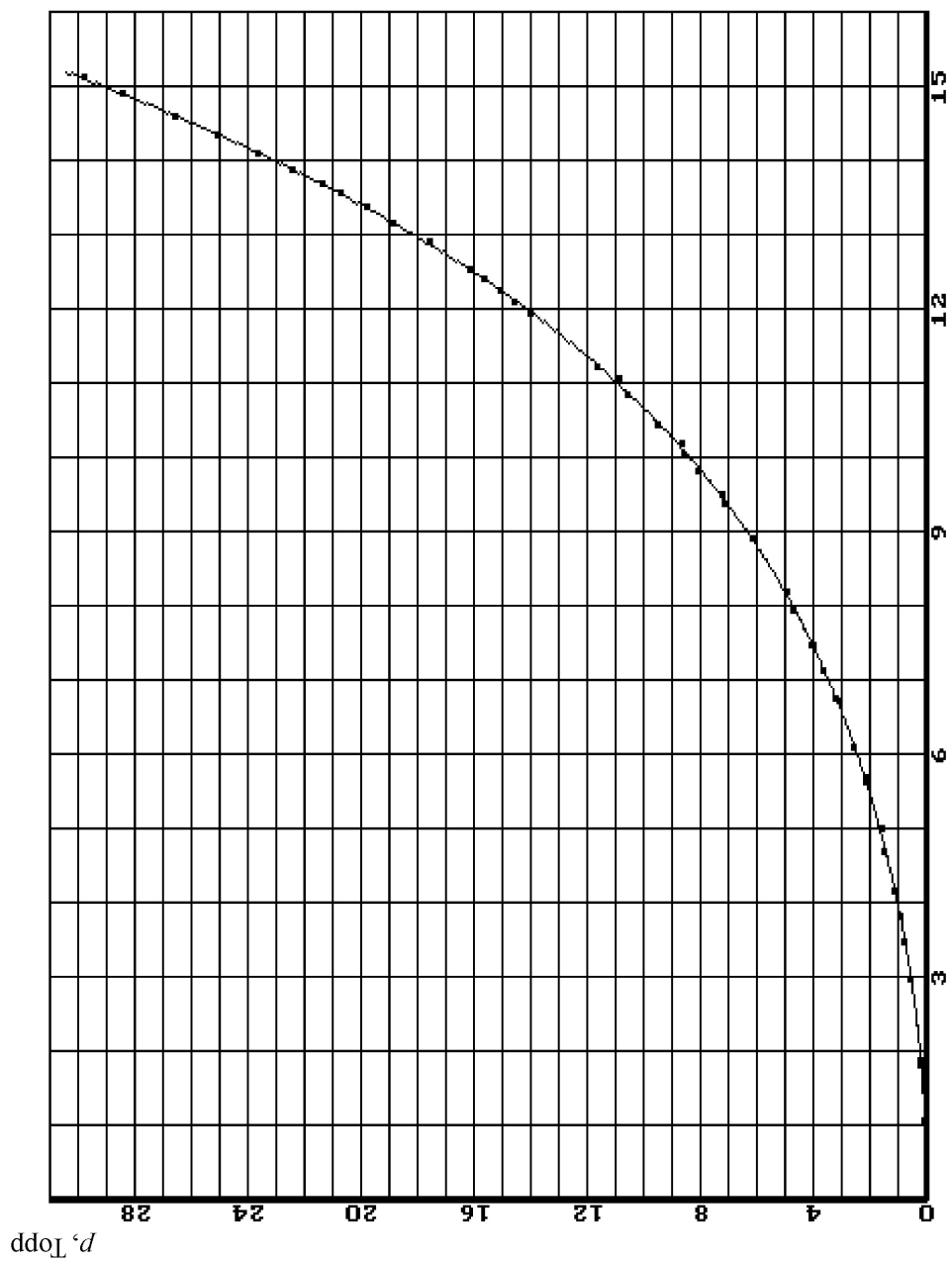


Рис. 94. Градуировочная функция теплоэлектрического вакуумметра сопротивления. Зависимость давления p от падения напряжения на нити накала U [5, с. 120]

Результаты градуировки теплоэлектрического вакуумметра сопротивления по масляному манометру в диапазоне $0,05 \div 30$ Торр представлены на рис. 94 в виде зависимости $p = f(U)$ (две независимые серии опытов). Она хорошо аппроксимируется функцией $p = f(U^2)$ в виде полинома 3-ей степени, то есть:

$$p = a_0 + a_1U^2 + a_2U^4 + a_3U^6, \quad (26)$$

где a_i – эмпирические коэффициенты. Среднеквадратическая погрешность составила $\pm 0,01$ Торр, то есть $\pm 0,01\%$ для середины диапазона. Это на несколько порядков превосходит точность промышленных вакуумметров, но речь идёт именно о единичном лабораторном приборе, а не о серийном. Необходимо также помнить, что показания прибора сильно зависят от состава газа. В любом случае этот результат показывает, что терморезисторные вакуумметры имеют высокий потенциал развития в плане повышения точности.

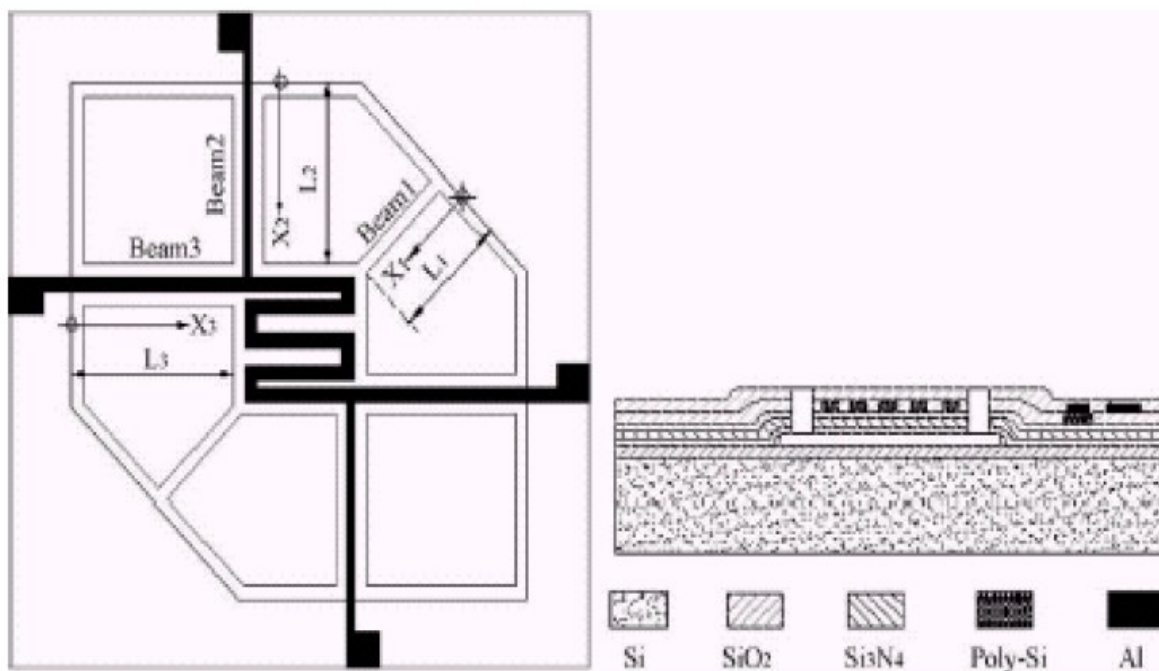


Рис. 95. Общая схема и поперечный разрез планарного микротеплового преобразователя $L_1 = 70$ мкм, $L_2 = L_3 = 98$ мкм [3, с. 121]

Микротепловые датчики созданы на основе микро- и нано-механических технологий [3, с. 120 и далее]. Планарный микротепловой

преобразователь HPS Series 925 MicroPirani компании MKS Instruments имеет рабочий диапазон $10^{-5} \div 10^3 \text{ Torr}$, быстродействие 50 мс и высокую устойчивость к вибрациям (рис. 95 и 96).

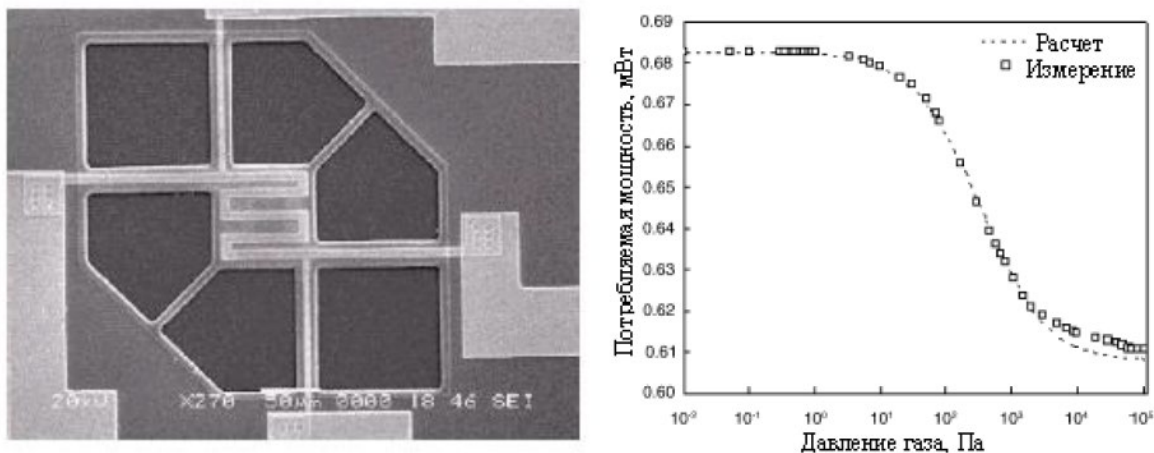


Рис. 96. Изображение того же преобразователя (рис. 95), полученное с помощью сканирующего электронного микроскопа, и его рабочая характеристика при стабилизированном токе накала 0,8 мА [3, с. 121]

Таблица 11. Основные характеристики тепловых преобразователей давления [9, с. 534]

Преобразователь	Диапазон измерений, Па	Погрешность измерений, %	Габаритные размеры, мм	D_y , мм	Материал
ПМТ-6-3	2,6...3,9·10 ³	-30...+50	Ø25×141	16	Металл
ПМТ-6-3Ф			Ø80×132	20	
ПМТ-6-3НХ			Ø30×140	16	
ПМТ-6-3Р			Ø25×156		
ПМТ-6-3М			Ø25×141		
ПМТ-6-3М-1			Ø25×133		
ПМТ-6-3С			Ø25×162		
ПДТ-20	4,0·10 ⁻² ...10 10...1,3·10 ³	±20 ±25	Ø35×265	10	Стекло С52-1
ПМТ-2	0,1...7,0·10 ⁻²	±20	Ø35×260		
ПМТ-16	3,0·10 ⁻² ...13 13...1,3·10 ³	±40 ±60	Ø33,5×285		
ПМТ-4М	0,1...7,0·10 ⁻²	±30	Ø32×108	16	Металл
ПДТ-18	6,0·10 ⁻² ...1,0 1,0...4,0·10 ³	-40...+60 -30...+40	Ø25×155		
ПДТ-8	1,3·10 ⁻² ...6,7·10 ²	±15	Ø24×110		
ПДТ-9	1,3·10 ⁻³ ...13	±20	Ø24×110		
ПДТСО-2-1	0,5...7,0·10 ³	±10	Ø56×120		

Примечание. В обозначении преобразователя указан тип соединения: Ф – фланцевое; НХ – накладным хомутом; Р – резьбовое, остальные – штуцерное.

Таблица 12. Основные технические характеристики вакуумметров с тепловыми преобразователями [9, с. 535]

Вакуумметр	Преобразователь	Диапазон измерений, Па	Погрешность измерений, %	Габаритные размеры, мм
ВТ-3	ПМТ-2	$0,13...7 \cdot 10^2$	± 30	320×185×150
ВТ-2А-П	ПМТ-М	$0,13...3 \cdot 10^2$	–	430×220×146
ВТБ-1	Типа ПМТ-6-3	$2,6...3,9 \cdot 10^3$	-40...+60	200×158×319
13ВТ3-003				100×158×206
Реле РВТ-2М				80×158×206
РВТ-1				100×158×328
РВБ-1	–	30 (срабатывание)	–	76×24×24
Образцовый ВТСО-1	ПДТСО-2-1	$0,5...7,0 \cdot 10^3$	± 10	80×150×295
Стрелочный ВТ-6	ПМТ-2	$0,1...1,33 \cdot 10^2$	± 30	180×160×305
		$1,33 \cdot 10^2...7,0 \cdot 10^2$	± 50	
Светоцифровой ВТБ-6	ПДТ-20	$4,0 \cdot 10^{-2}...10,0$	± 25	120×158×470
		$10,0...3,0 \cdot 10^3$	± 30	
Цифровой ВТБ 2/3 -002	ПДТ-18	$6,0 \cdot 10^{-2}...4,0 \cdot 10^3$	-50...+70	120×158×455
ДВТ-3/0-001	ПМТ-6-3М	$1,0...4,0 \cdot 10^3$	-50...+100	74×49×52
Цифровой УКВ-3/0-002				212×128×490
Цифровой ВТЦ-1	ПДТ-8,	$1,3 \cdot 10^{-2}...6,7 \cdot 10^1$	± 20	260×110×250
	ПДТ-9	$1,3 \cdot 10^{-3}...13,0$	± 30	

Примечание. Вакуумметры и реле имеют аналоговый выход 0...10 В (кроме ВТ-3, ВТ-2А-П, ВТСО-1, РВБ-1).



Рис. 97. Вакуумметр Пирани Pfeiffer Vacuum CenterLine TTR 96S терморезисторный [https://vacuum-id.ru/catalogue/vakuummeter/pfeiffer-vacuum-centerline-ttr-96s/]



Рис. 98. Вакуумметр MKS Instruments Series 974B
[<https://vacuum-id.ru/catalogue/vakuummeter/mks-instruments-series-974b/>]

В табл. 11 и 12 приведены основные технические характеристики тепловых преобразователей давления и вакуумметров.

На рис. 97 и 98 показаны некоторые современные зарубежные датчики Пирани.

v12 § 4. Другие виды тепловых вакуумметров

Термисторные вакуумметры – теплоэлектрические вакуумметры сопротивления, использующие вместо металлической нити накала полупроводниковые терморезисторы, принцип действия которых также основан на изменении мощности теплоотвода через разреженный газ от давления этого газа в определённом диапазоне. Сопротивление полупроводниковых терморезисторов очень сильно зависит от их температуры. на порядок сильнее, чем в случае металлов. При этом зависимость эта – обратная, – с ростом температуры сопротивление падает:

$$R = Ae^{\frac{B}{T}}, \quad (27)$$

где A и B – константы, зависящие от материала термистора. Таким образом, температурный коэффициент сопротивления:

$$\alpha \approx -(0,02 \div 0,04) 1/K \text{ – для термисторов;}$$

$$\alpha \approx 0,003 \div 0,004 1/K \text{ – для металлов.}$$

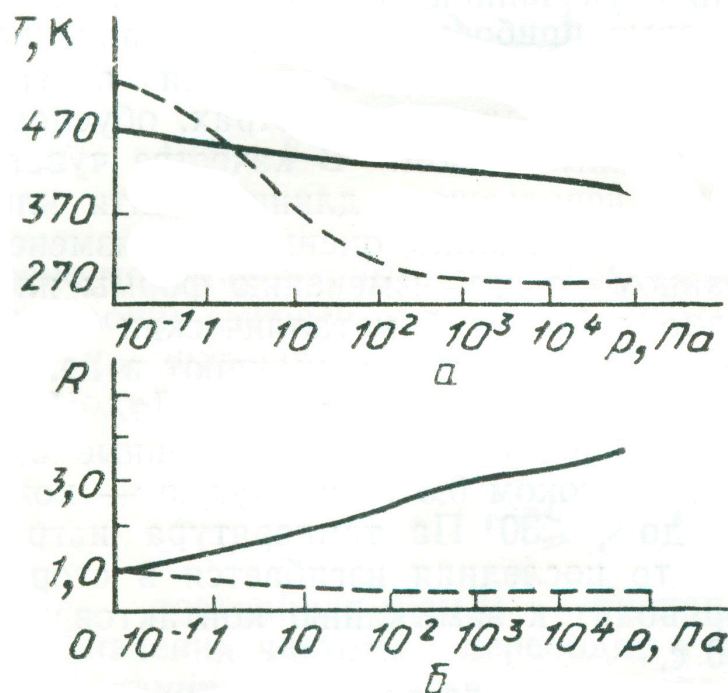


Рис. 99. Зависимости $T = f(p)$ и $R = f(p)$ для термистора (сплошная линия) и вольфрама (штриховая линия) [1, с. 49]

Температурный коэффициент сопротивления термисторов обратно пропорционален квадрату температуры:

$$\alpha = \frac{1}{R} \cdot \frac{dR}{dT} = \frac{d \ln R}{dT},$$

$$\ln R = \ln A + \frac{B}{T},$$

$$\alpha = d \ln A + B \frac{d}{dT} \left(\frac{1}{T} \right) = B(-T^{-2}).$$

Окончательно:

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \tag{28}$$

Зависимости температуры чувствительного элемента и его сопротивления от давления для термисторов и металлов показана на рис. 99.

Однако термисторные вакуумметры имеют ряд недостатков. Высокая чувствительность усиливает влияние температуры окружающей среды, термисторы недостаточно стабильны и подвержены старению.

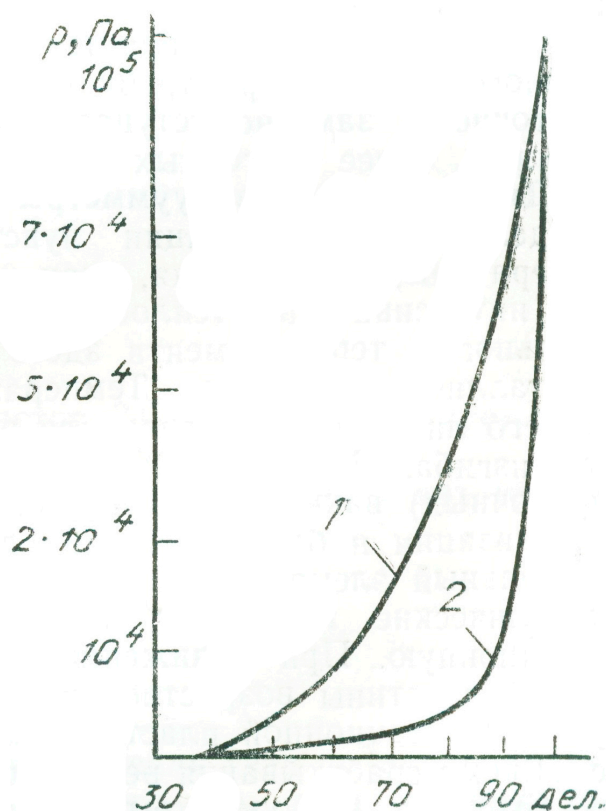


Рис. 100. Градуировочные кривые теплового манометра сопротивления, работающего в конвекционном режиме (1) и в обычном терморезисторном режиме (2) [1, с. 49]

Конвекционные манометры также являются разновидностью теплоэлектрических вакуумметров сопротивления. Конвекция, как тип теплопередачи, проявляется при $p > 10^3 \div 10^4$ Па. Как правило, температура нити накала конвекционных манометров выше, чем у обычных терморезисторных. Конвективный теплообмен будет зависеть от ориентации чувствительного элемента в пространстве; горизонтально расположенная нить будет создавать более интенсивные конвекционные

потоки, чем вертикальная. Диапазон измерений этих вакуумметров сдвинут в сторону более высоких давлений и может достигать примерно до 1 атм .

На рис. 100 показаны градуировочные кривые конвекционного манометра и того же прибора, работающего в обычном режиме тепло-электрического вакуумметра сопротивления. Конвекционные манометры требуют индивидуальной градуировки каждого датчика и не обладают высокой точностью.

Дилатационные вакуумметры. Принцип их действия основан на тепловом расширении металлической нити при повышении температуры; возникающая при этом деформация может изменить условия теплообмена. Чувствительным элементом обычно служит или длинная нить, или биметаллическая пластина.

Струнные вакуумметры. Чувствительный элемент – тонкая стальная струна, натянутая между полюсами постоянного магнита. при прохождении переменного тока испытывает автоколебания, которые фиксируются и обрабатываются электронной системой измерительного блока. Диапазон – $0,5 \div 7 \cdot 10^3 \text{ Па}$, погрешность – $\pm 10\%$.

v13 § 5. Некоторые технические характеристики тепловых вакуумметров

Быстродействие (инерционность). Связана с инерционностью выработки сигнала чувствительным элементом преобразователя (постоянная времени τ) и быстродействием измерительной схемы вакуумметра (постоянная времени τ'). Постоянная времени регламентируется как время, необходимое для возрастания сигнала до 64% его конечного значения или для снижения сигнала до 36% от начального. Она зависит от теплоёмкости чувствительного элемента, режима работы вакуумметра, значения измеряемого давления. С понижением давления τ растёт.

Режим постоянной температуры нити значительно повышает быстродействие по сравнению с режимом постоянного тока (см. табл. 13).

Таблица 13. Постоянная времени тепловых преобразователей для различных режимов работы [1, с. 53]

Тип преобразователя	Постоянная времени τ , с, при режимах	
	постоянного тока нагрева	постоянной температуры
ПМТ-2	9	4
ПДТ-9	5	—
ПМТ-6-3	0,8	0,1

В большинстве случаев τ' значительно меньше 0,1 с.

Показания тепловых вакуумметров сильно зависят от природы газа. Обычно вакуумметры градуируются по сухому воздуху или азоту; соответствующие градуировочные графики входят в комплект приборов. Чтобы определить давление для других газов, используют формулы:

$$p_z = p_e \cdot q_z, \quad (29)$$

где p_z – действительное значение давления для данного газа; p_e – показания вакуумметра, проградуированного по воздуху; q_z – коэффициент относительной чувствительности вакуумметра по данному газу.

Таблица 14. Коэффициент относительной чувствительности тепловых вакуумметров для различных газов [1, с. 56]

Газ	Коэффициент относительной чувствительности q_T для вакуумметров		Газ	Коэффициент относительной чувствительности q_T для вакуумметров	
	тепловых	радиоизотопных		тепловых	радиоизотопных
Воздух	1,00	1,00	C ₂ H ₄	0,66	—
H ₂	0,67	0,24	N ₂	0,99	1,00
He	1,03	0,21	O ₂	1,02	1,17
CH ₄	0,69	1,16	H ₂ S	0,81	—
H ₂ O	0,77	0,86	Ar	1,60	1,19
Ne	1,38	0,50	CO ₂	0,88	1,54
CO	0,99	1,11	Kr	2,10	1,92
			Xe	2,49	3,02

Для смеси газов

$$p_{см} = p_v \cdot q_{см}, \quad (30)$$

где индекс «см» относится к смеси газов.

$$q_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{v_i}{q_{2i}}}. \quad (31)$$

здесь $v_{и}$ – относительная концентрация i -го газа. Коэффициенты относительной чувствительности тепловых вакуумметров для различных газов приведены в табл. 14.

К достоинствам тепловых вакуумметров следует отнести надёжность и сравнительную простоту устройства, при их работе не меняется состав газа, их измерительные схемы легко поддаются автоматизации. Недостатки – инерционность, нелинейность характеристической зависимости, влияние температуры окружающей среды, невысокая точность.

v14 Глава 3. ИОНИЗАЦИОННЫЕ ВАКУУММЕТРЫ

v15 § 1. Теоретические основы работы ионизационных вакуумметров

Действие ионизационных вакуумметров основано на эмиссии электронов в газовую фазу и поглощении их соответствующим электродом в электронных лампах специальной конструкции. По пути «следования» через газовую фазу электроны ионизируют молекулы газа, создаётся ионный ток, который может быть зафиксирован электрической измерительной схемой. Степень ионизации будет зависеть от разреженности газа, то есть – от степени вакуума. На рис. 101 показана зависимость вероятности ионизации некоторых газов от энергии электронов.

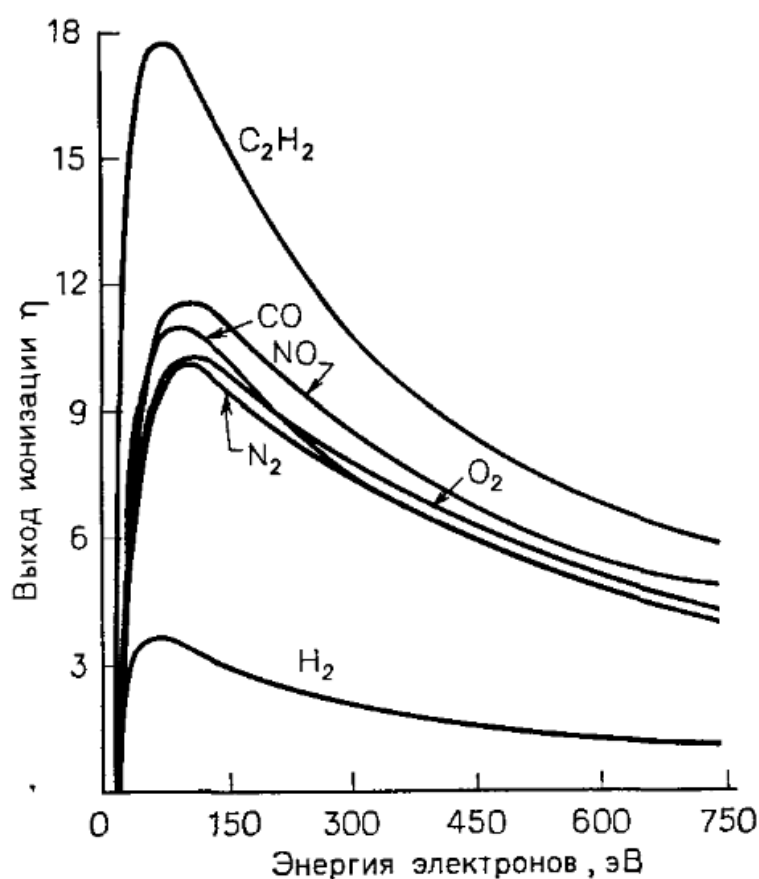


Рис. 101. Зависимость вероятности ионизации некоторых газов от энергии электронов [27, с. 163]

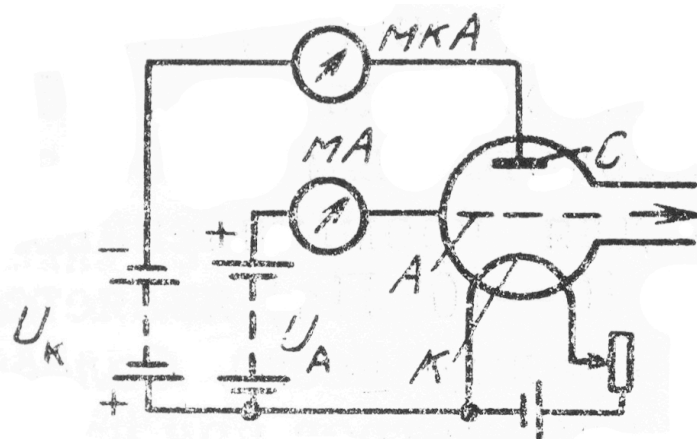


Рис. 102. Простейшая схема электронной лампы с эмиссией электронов [1, с. 58]

Ионизационная вакуумметрия охватывает очень широкий диапазон измеряемых давлений – от самых низких, которые только можно получить в вакуумной технике, $10^{-10} \div 10^{-9}$ Па до высоких, приближающихся к 1 атм, $10^2 \div 10^4$ Па. Разумеется, для разных диапазонов вакуума используются преобразователи различной конструкции.

В ионизационной вакуумметрии используется контролируемая ионизация газа при термоэлектронной эмиссии. В 1916 году Бакли предложил применить обычную электровакуумную лампу триод в качестве ионизационного преобразователя давления. В любом ионизационном датчике (рис. 102) имеется источник электронов – прямоканальный катод К. Он находится под положительным потенциалом U_K относительно земли (или корпуса прибора). В простейшем случае металлический катод нагревается и эмиттирует (испускает) электроны (вакуумметры с горячим катодом). Анод А находится под потенциалом U_A (этот потенциал ускоряет и отводит первичные и вторичные электроны). По пути к аноду электроны ионизируют газ, находящийся в вакуумной камере. Дополнительный электрод – коллектор С является приёмником ионов, которые образуют в цепи коллектор – корпус постоянный ток, который может быть усилен и измерен. Этот коллекторный ионный ток и может служить мерой давления газа. При этом надо поддерживать постоянной интенсивность ионизации, то есть – электронный ток эмиссии I_e в диапазоне $10^{-5} \div 10^{-2}$ А. Это можно осуществлять автоматически.

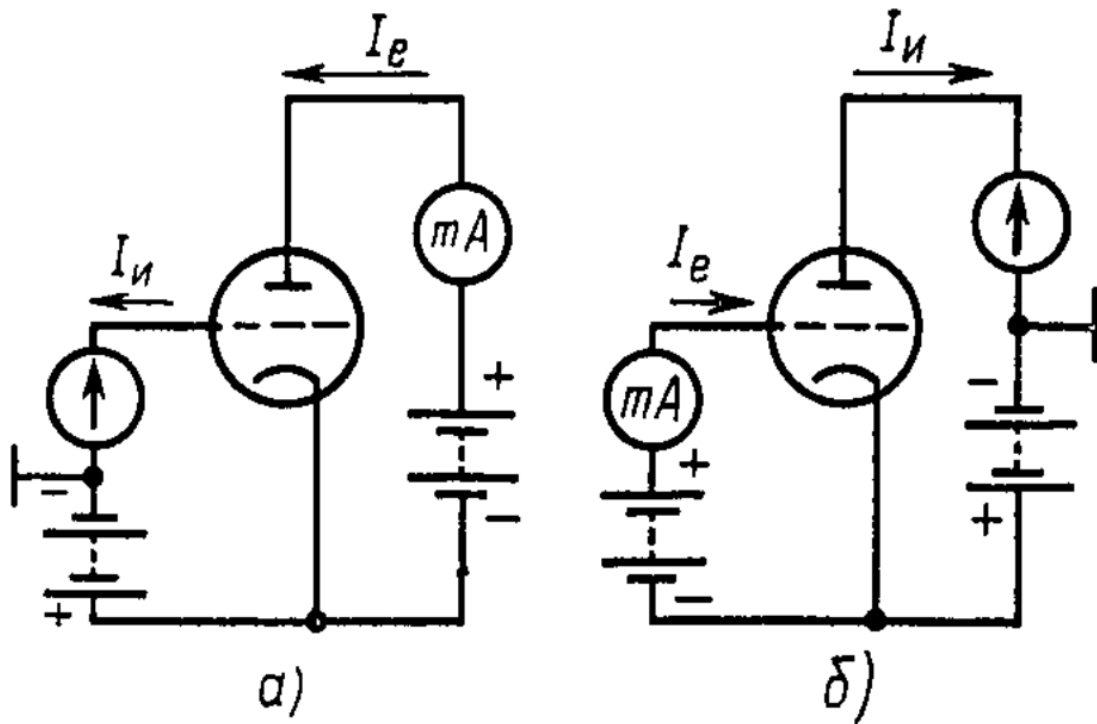


Рис. 103. Схемы электронных преобразователей: а) – с внутренним коллектором; б) – с внешним коллектором [11, с. 145]

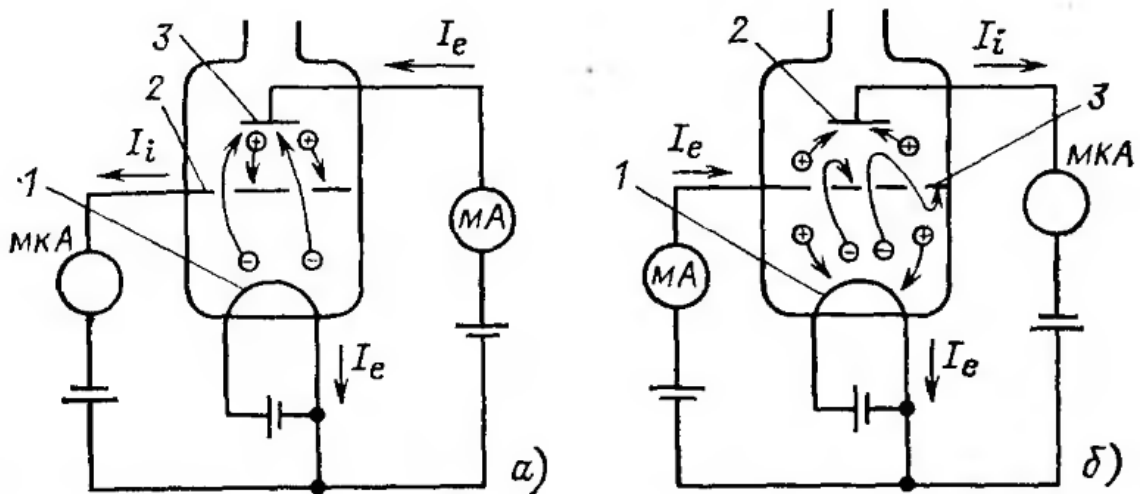


Рис. 104. Движение электронов и ионов в ионизационных преобразователях; схемы с внутренним (а) и внешним (б) коллектором.
1 – катод; 2 – коллектор ионов; 3 – анод [28, с. 9]

Ионизационные преобразователи имеют две основные схемы: с **внутренним коллектором** и с **внешним коллектором** – рис. 103.

Схема с внутренним коллектором (рис. 103а) аналогична обычному триоду. На коллектор ионов – сетку, – подаётся отрицательное относительно катода напряжение несколько десятков вольт, а на анод – положительное напряжение $100 \div 200 \text{ В}$. Электроны образуют ток I_e от катода к аноду и, соударяясь с молекулами газа, ионизируют его, создавая ионный ток I_u положительных ионов (при этом получают вторичные электроны). Последний измеряется гальванометром или усиливается соответствующим усилителем.

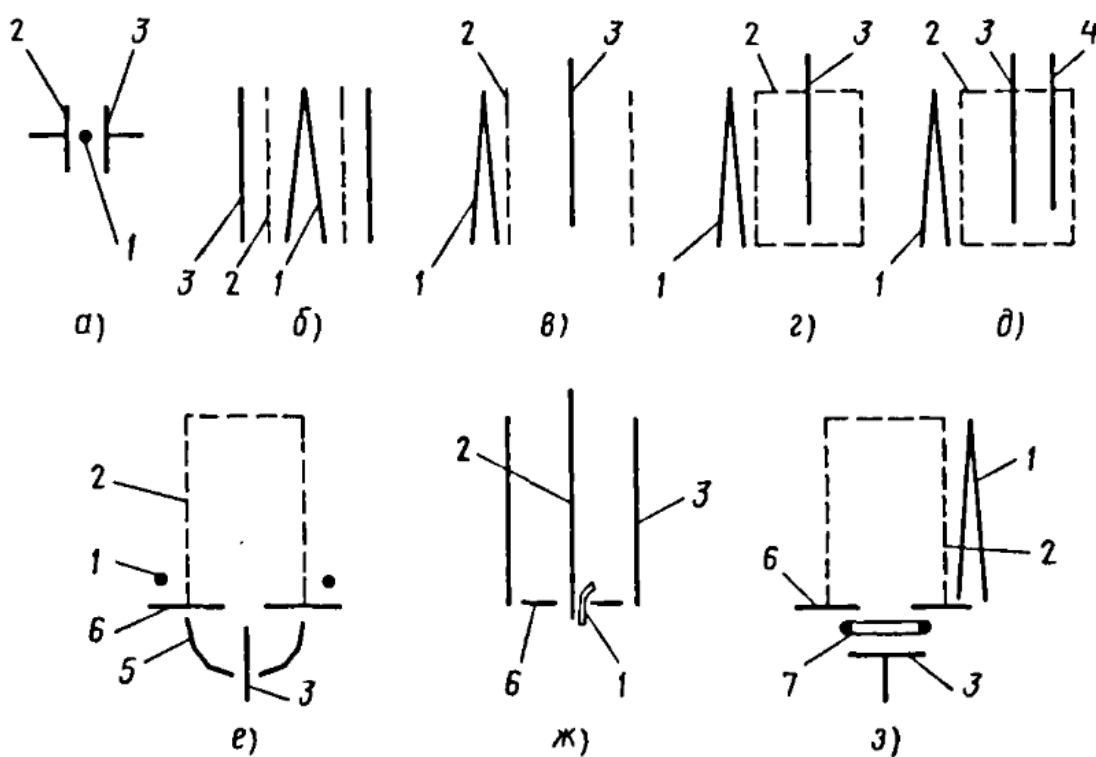


Рис. 105. Принципиальные схемы ионизационных преобразователей: а – прямопролётный (высоких давлений); б – с цилиндрическим (внешним) коллектором; в – с осевым коллектором (Байярда-Альперта); г – с осевым коллектором и торцовыми сетками; д – с осевым коллектором и модулятором; е – экстракторный; ж – орбитронный; з – супрессорный. 1 – катод; 2 – анод; 3 – коллектор; 4 – модулятор; 5 – отражатель ионов; 6 – экран; 7 – супрессор [9, с. 537]

В схеме с внешним коллектором (рис. 103б) на сетку подаётся положительный потенциал, а на анод – отрицательный, причём последний становится коллектором. Электроны, летящие от катода к анодной сетке, совершают вокруг неё несколько колебаний. Это увеличивает длину траектории электронов и, следовательно, – повышает вероятность ионизации молекул газа. Таким образом, схема с внешним коллектором является более чувствительной. Часть образовавшихся между сеткой и катодом положительных ионов не участвует в ионном токе, но это не оказывает существенного влияния.

Траектории движения электронов и ионов показаны на рис. 104.

По конструкции преобразователей ионизационные манометры делятся на три основных класса:

1) преобразователи с миниатюрными, как правило – плоскими, электродами (вакуумметры Шульца – Фэлпса или прямопролётные). Рабочий диапазон – средний вакуум от $10^{-3} \div 10^{-2} \text{ Па}$ до $10 \div 10^2 \text{ Па}$;

2) преобразователи с внешним цилиндрическим коллектором (то есть – триодные). Рабочий диапазон – высокий вакуум от $10^{-5} \div 10^{-4} \text{ Па}$ до 10^{-1} Па ;

3) преобразователи с внутренним осевым коллектором (преобразователи Байярда – Альперта). Рабочий диапазон – высокий и сверхвысокий вакуум от 10^{-8} Па до $10^{-3} \div 10^{-1} \text{ Па}$.

Кроме этого существует ряд модификаций основных типов. Их схемы показаны на рис. 105.

v16 § 2. Вакуумметры прямопролётные и стержневого типа

Общая схема прямопролётных вакуумметров (Шульца – Фэлпса) показана на рис. 105а. Работа ионизационных вакуумметров при давлениях выше $10^{-3} \div 10^{-1} \text{ Па}$ накладывает жёсткие условия на стабильность и долговечность термокатода. Материал последнего должен обладать повышенной химической стойкостью, особенно – к окислению: иридий с покрытием из оксидов тория или иттрия, платина, родий, рений и др. Иридиевый катод имеет рабочую температуру $\sim 1500 \text{ К}$. тогда как вольфрамовый – $\sim 2300 \text{ К}$; причём он работоспособен до давления $\sim 10^2 \text{ Па}$.

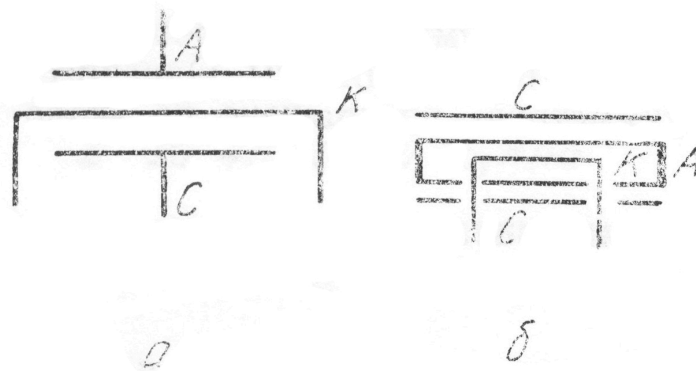


Рис. 106. Преобразователи с миниатюрными плоскими электродами (а) и ПМИ-10-2. А – анод; К – катод; С – коллектор [1, с. 66]

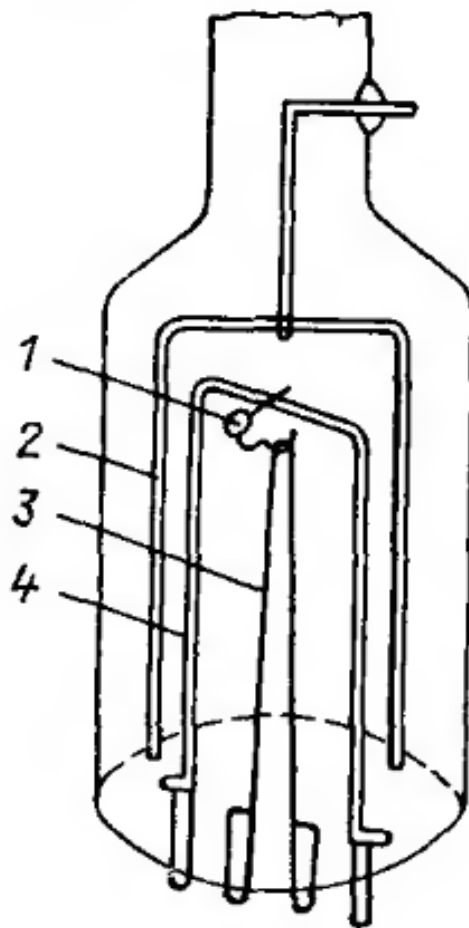


Рис. 107. Преобразователь стержневого типа: 1 – изолятор; 2 – коллектор; 3 – катод; 4 – анод [28, с. 66]

При указанных сравнительно высоких давлениях прямолинейная зависимость ионного тока от давления искривляется, что приводит к уменьшению чувствительности. Это делает необходимым принятие конструктивных мер по обеспечению более эффективной работы коллектора и снижению электронного тока путём уменьшения пространственного заряда.

Преобразователь с миниатюрными плоскими электродами показан на рис. 106а. При данной конфигурации анода, катода и коллектора с малыми расстояниями между ними обеспечивается прямой пролёт электронов между катодом и анодом. Эффективность работы коллектора обеспечивается его большой площадью и закрытостью конструкции.

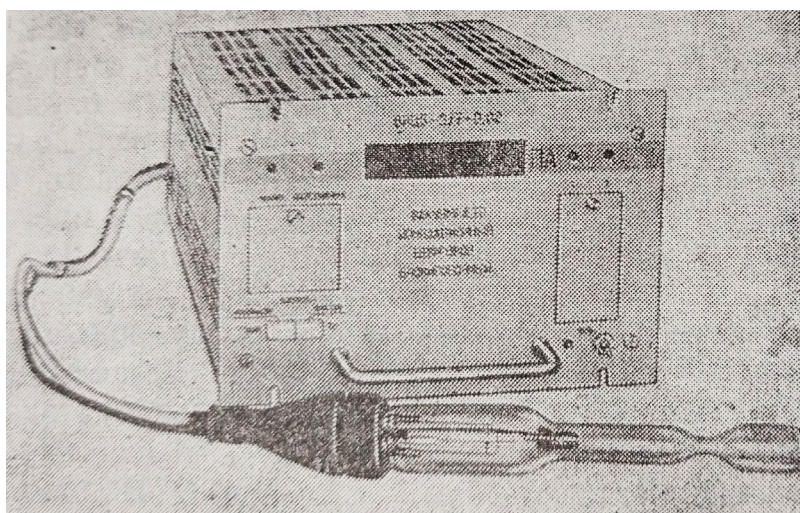


Рис. 108. Цифровой вакуумметр ВИЦБ-2/7-002 с преобразователем стержневого типа ПМИ-51 [1, с. 69]

В работе [29] предложена следующая конструкция прямопролётной модели миниатюрного преобразователя (рис. 106б). С торцов невысокого (2 мм) цилиндрического анода А располагаются две параллельные никелевые пластины на расстоянии 4 мм друг от друга. Они составляют коллектор С. Внутри анода между пластинами коллектора помещается воздухостойкий катод К. Эта схема осуществлена в закрытом металлическом преобразователе ПМИ-10-2, который комплектует вакуумметр ВИТ-3. Долговечность катода при 10^2 Па 100 часов.

Таблица 15. Характеристики некоторых ионизационных вакуумметров [1, с. 68]

Тип, марка вакуумметра	тип, марка преобразователя	Диапазон измерений, Па	Диапазон индикации, Па	Форма отсчета давления	Основная относительная погрешность, %	Наработка на отказ, ч
ВИГ-3 (ионизационная часть)	ПМИ-10-2 ПМИ-51	10^{-3} — 10^2 10^{-4} —1	$7 \cdot 10^{-5}$ — $1 \cdot 10^{-4}$	По пересчетным формулам	$\pm 60^*$ [(1—3) (10^{-8} — 10^{-5} А)] $\pm 35^*$ [(3—10) (10^{-9} — 10^{-5} А)]	800
ВИЦБ-2/7-002	ПМИ-51	$7 \cdot 10^{-5}$ — 10	—	Непосредственный отсчет	± 40 ($7 \cdot 10^{-5}$ — 10^{-4} Па) (1—10 Па) ± 35 (10^{-4} — 10^{-1} Па) ± 60 (10^{-1} —1 Па)	1000
ВИ-14	ПМИ-27 (система 2)	—	10^{-2} — 10	По пересчетным формулам	—	1000
Ionivac IM 110D («Лейболд—Хереус»)	IR 10 IE 10	10^{-3} — 10^2	—	Непосредственный отсчет	± 10	—
IMG 060B («Бальперс»)	IMR 110 IMR 110P IMR 112	10^{-3} — 10^2	10^{-4} — 10^{-3}	То же	± 15	—

* Для линейных шкал вакуумметра.

Модель преобразователя стержневого типа ПМИ-51 была описана в работе [30] – рис. 107. Диапазон измерений этого прибора находится между средним и высоким вакуумом. Коллектор 2 и анод 4 изготовлены из сравнительно толстой проволоки и имеют П-образную форму. Они располагаются в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, по оси пересечения которых натягивается через изолятор 1 иридиевый воздустойкий катод 3 (с покрытием из оксида иттрия) в форме петли. Симметричность электродов позволяет периодически их очищать от сорбированных газов путём переключения напряжения на коллекторе и аноде. В этом преобразователе снижены фоновые токи из-за малой площади коллектора и сдвинут диапазон измерений в сторону более высоких давлений из-за малого расстояния между электродами.

Разработанный датчик входит в комплект серийного вакуумметра ВИЦБ-2/7-002 (рис. 108). Также он может работать с вакуумметрами ВИТ-2 и ВИТ-3 при подключении через кабельный переходник.

Характеристики некоторых ионизационных вакуумметров и преобразователей представлены в табл. 15.

v17 § 3. Преобразователи с внешним цилиндрическим коллектором

Общая схема этих преобразователей показана на рис. 105б, а принципиальное устройство – на рис. 109. Прямоканальный катод К располагается по оси лампы и, как правило, имеет форму петли с выводами в цоколе. Материалом чаще всего служит вольфрам, иногда применяют другие, более устойчивые, металлы и покрытия. Анод А располагается коаксиально вокруг катода. Он имеет вид редкой цилиндрической сетки с выводами также в цоколе и изготавливается из молибдена, вольфрама, иногда – из нихрома. Соосно с анодом и катодом помещается тонкий цилиндрический коллектор С, на котором собираются положительные ионы. Он имеет вид сплошной ленты, свёрнутой в цилиндр и может быть изготовлен из никеля (чаще всего), платины, молибдена или вольфрама. Вывод коллектора осуществляется вверху лампы на патрубке присоединения к вакуумной системе, вблизи самой

колбы. При этом металлический вывод в виде проволоки вакуум-плотно спаивается со стеклом. Иногда коллектор напыляется на внутреннюю поверхность колбы преобразователя.

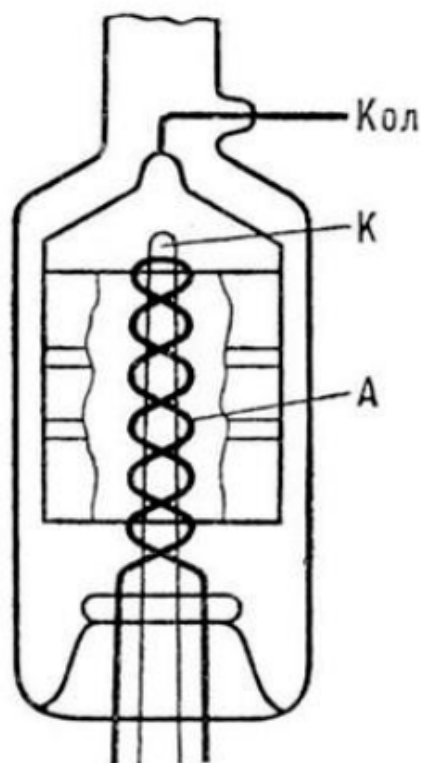


Рис. 109. Принципиальная схема ионизационных манометрических ламп с внешним коллектором: К — прямонакальный катод; А — анод (сетка); Кол — коллектор ионов [3, с. 123]

Анодная сетка имеет довольно редкие витки, что делает её достаточно прозрачной для эмиттированных с термокатода электронов. То есть большая их часть пролетает мимо витков анода, затем они замедляются положительным электрическим полем коллектора, как бы останавливаются и затем вновь возвращаются к сетке. Таким образом, данная конструкция электродов способствует многократному, до пяти раз, пролёту электронов мимо сетки в прямом и обратном направлении («электронные осцилляции»). В конце концов, электроны попадают на анод. Следовательно, путь электронов значительно увеличивается и ионизация газа растёт. Это способствует возможности измерения более

высокого вакуума, то есть – сдвигает диапазон в сторону более низких давлений.

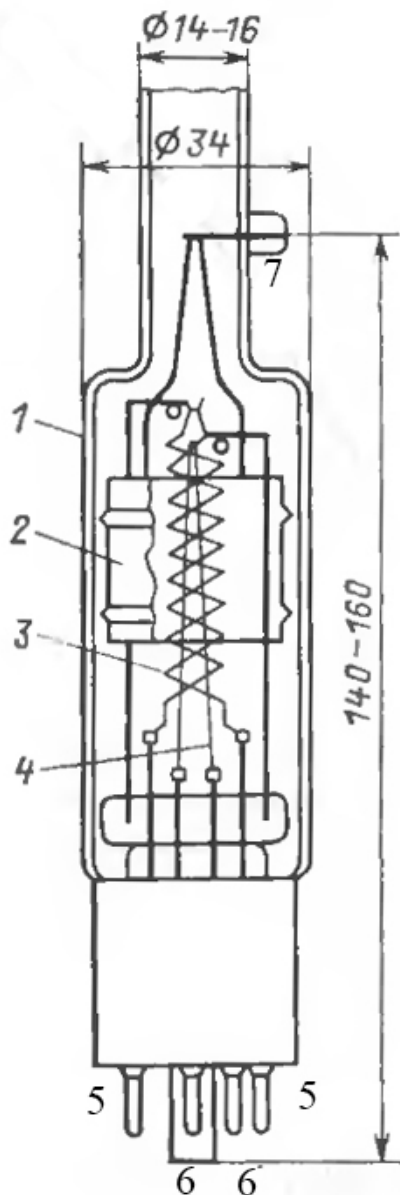


Рис. 110. Ионизационный преобразователь закрытого типа ПМИ-2. 1 – стеклянный баллон; 2 – коллектор ионов; 3 – анод (сетка); 4 – катод; 5 – выводы сетки; 6 – выводы катода; 7 – вывод коллектора [28, с. 17]

В нашей стране долгое время выпускались ионизационные преобразователи ПМИ-2 (старое обозначение – ЛМ-2), которые практически точно повторяют описанную конструкцию (рис. 110 и 111). Материал: катод – вольфрам (диаметр 0,1 мм); анод – молибден; коллектор – никелевая фольга (диаметр 27 мм и высота 26 мм). Катод имеет

форму петли, концы которой обращены к цоколю и привариваются к выводам. Анодная сетка выполнена из тонкой проволоки, закрученной в бифилярную спираль, концы которой также привариваются к соответствующим выводам. Выводы анода и катода впаяны в стеклянное основание цоколя и выходят наружу; на этом же основании крепятся проволочные стойки, поддерживающие сверху петлю катода и спираль анода. Коллектор держится на двух сравнительно толстых проволоках, которые привариваются к верхнему выводу. Впаянному в стекло. Извне к этому выводу припаивается металлический колпачок, посаженный на термостойкий клей; к колпачку крепится соответствующий контакт соединительного кабеля. Такое устройство позволяет более точно измерять малые коллекторные токи.

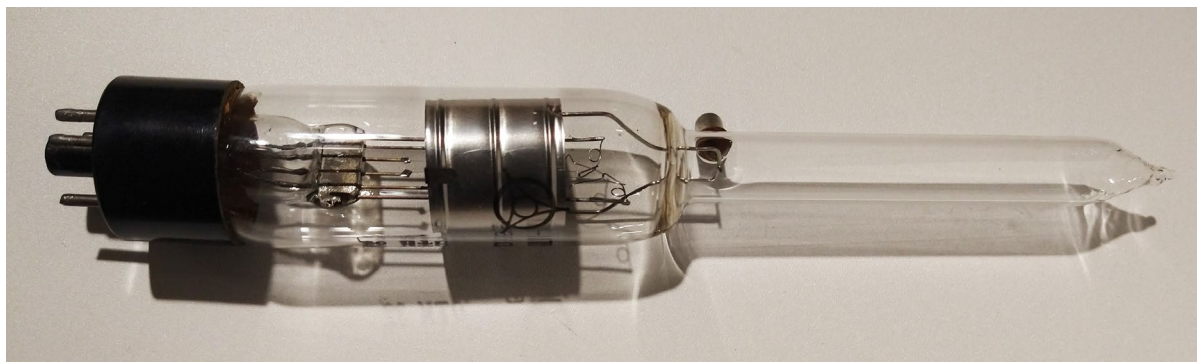


Рис. 111. Преобразователь ПМИ-2; общий вид. В запаянном состоянии [фото автора]

В исходном состоянии (запаянном) лампа не имеет внутри геттера, как у термопарной лампы (см. рис. 59) – рис. 111, – так как настройка лампы может происходить непосредственно после присоединения к вакуумной системе, в которой подразумевается наличие высокого вакуума. Положение преобразователя при работе – строго вертикальное. К вакуумной системе преобразователь крепится или через грибковое уплотнение, или спайкой с переходниками – коваровыми трубками; к стеклянным установкам он может просто припаиваться.

Аналогичное описанному имеет устройство лампа ПМИ-3-2 (ЛТ-3-2) – рис. 112, но катод изготовлен из иридия с покрытием из оксида иттрия. Электродная система смонтирована на металлическом фланце Ду 50, который крепится на вакуумную камеру через прокладки из

красной меди. Катод сменный; можно заменить сгоревший катод или поменять вольфрамовый на иридиевый или наоборот.

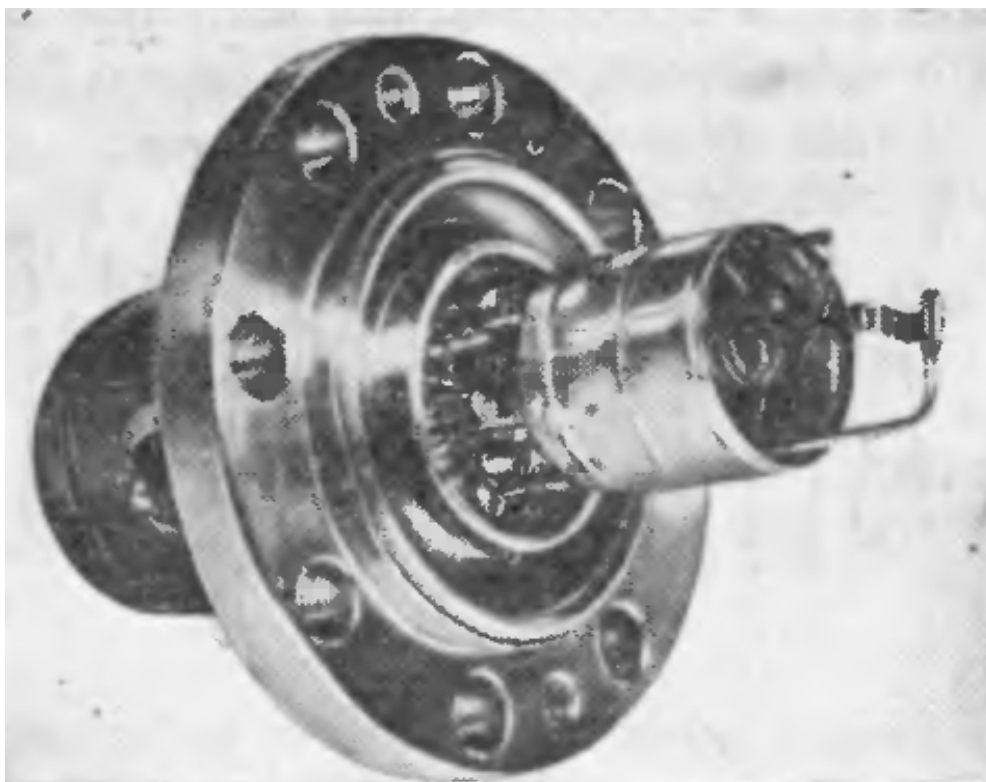


Рис. 112. Ионизационный преобразователь открытого типа с цилиндрическим коллектором ПМИ-3-2 [28, с. 16]

Оба преобразователя входят в комплект комбинированных вакуумметров ВИТ-1 (рис. 64), ВИТ-2 (рис. 65), ВИТ-3 (рис. 66), и по факту используются до сих пор. В условиях высокого вакуума срок службы ПМИ-2 – 750 часов, ПМИ-3-2 – 500 часов.

Таблица 15. Чувствительность лампы ПМИ-2 по отношению к различным газам [1, с. 129]

Газ	N ₂	H ₂	He	Ar	CO ₂	O ₂	Hg	CH ₄	Ne	CO
R	1	0,43	0,16	1,30	1,6	0,85	2,5	1,5	0,27	1,04

Следует заметить, что показания ионизационных манометров зависят от рода газа – табл. 16.

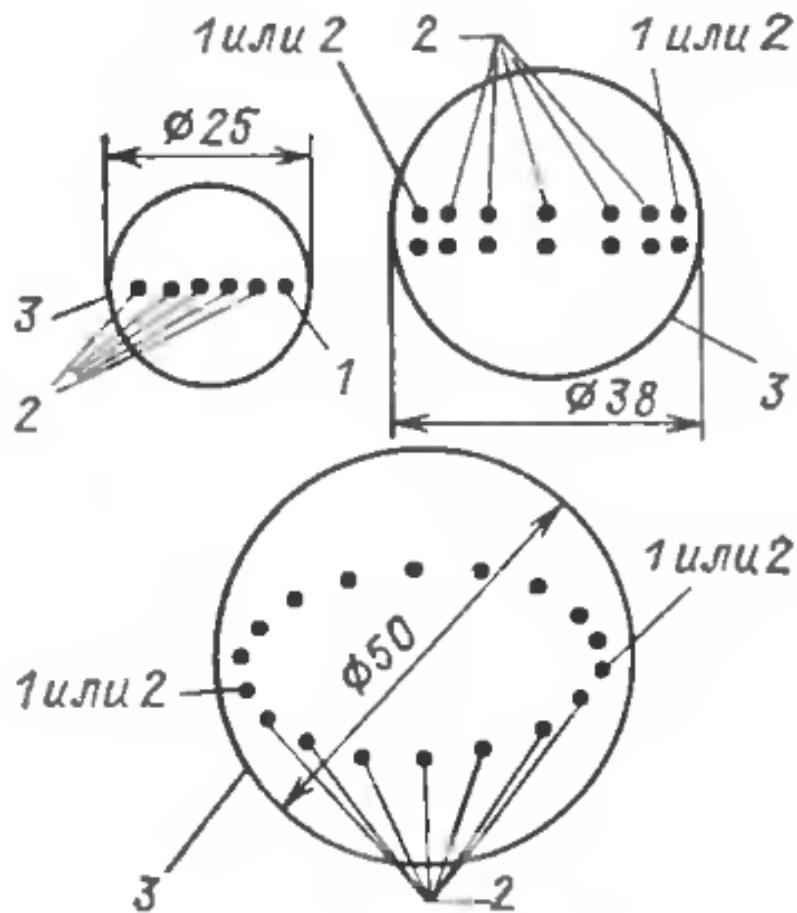


Рис. 113. Поперечные сечения электродных систем ионизационных преобразователей с цилиндрическим коллектором, обеспечивающих повышение чувствительности: 1 – катод; 2 – анод; 3 – коллектор [28, с. 17]

Повысить общую чувствительность вакуумметров с цилиндрическим коллектором можно, увеличив длину пробега электронов. Для этого предложено [31] изготавливать анод из нескольких петлеобразных параллельных шпилек из вольфрамовой проволоки (диаметр 0,3 мм), причём катод смещён в сторону коллектора (рис. 113). Предложено три модификации.

1. Анодные шпильки и катод находятся в плоскости, проходящей через ось преобразователя и параллельны друг другу, в сечении – это точки, лежащие на одной прямой. Катодом является ближайший к коллектору электрод.

2. Электроды лежат в двух параллельных плоскостях по обе стороны от оси, которой они параллельны. Катодами являются два электрода, также расположенные около коллектора.

3. Электроды, параллельные между собой, располагаются по поверхности эллиптического цилиндра, ось которого совпадает с осью преобразователя. Сами электроды параллельны этой же главной оси. Расстояния между электродами неодинаковое; катоды также находятся ближе всего к коллектору. В поперечном сечении электроды образуют эллипс.

Чувствительность этих трёх модификаций соотносится как 0,3:0,7:1,0 соответственно.

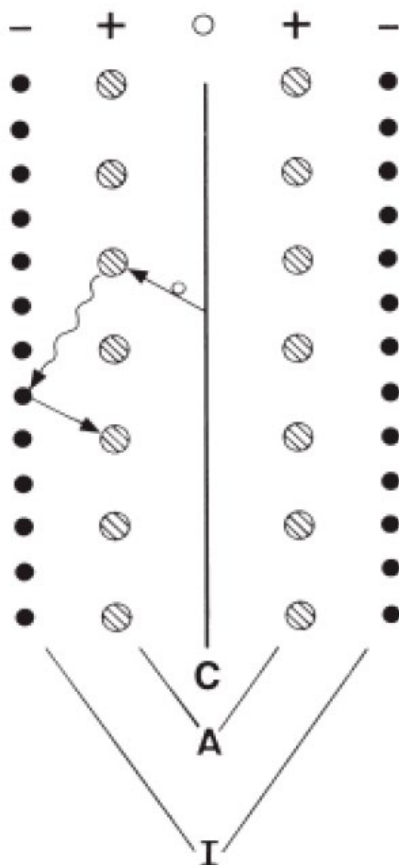


Рис. 114. Объяснение рентгеновского излучения в ионизационном вакуумметре. Электроны e^- , выпущенные катодом С, ударяются об анод А и образуют мягкое рентгеновское излучение. Радиация в основном образуется в области коллектора ионов I и образует там фотоэлектроны e_s^- . С – катод; А – анод; I – коллектор ионов [16, с. 93]

Однако главной причиной довольно высокого нижнего предела рабочего диапазона давлений ($\sim 10^{-5}$ Па) является наличие мягкого рентгеновского излучения с анода (рис. 114). Оно приводит к появлению в цепи коллектора паразитного фонового тока, который не зависит от давления газа. Он прибавляется к коллекторному току и снижает чувствительность преобразователя.

v18 § 4. Ионизационные вакуумметры с осевым коллектором

Отрицательное воздействие рентгеновского излучения существенно снижено в конструкции вакуумметра, разработанного Байардом и Альпертом в 1950 году. Общая схема этих преобразователей показана на рис. 105в, а принципиальное устройство – на рис. 115. Одна из первых ламп показана на рис. 116.

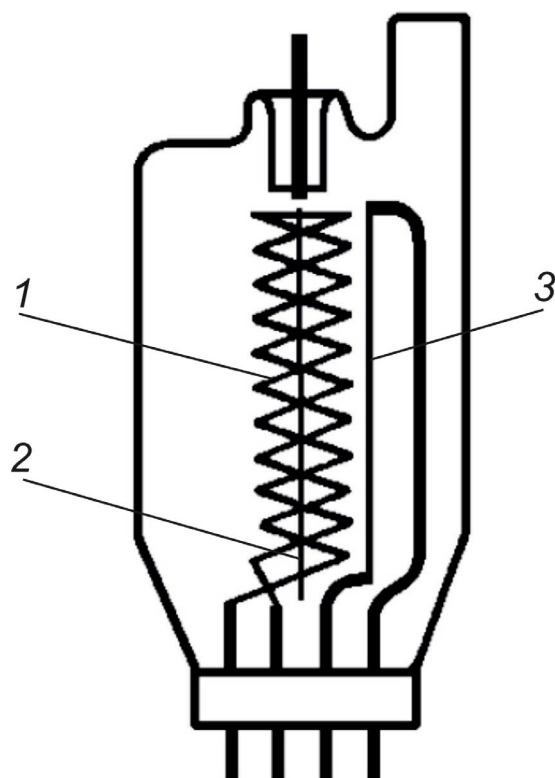


Рис. 115. Принципиальная схема ионизационных манометрических ламп с внутренним коллектором: 1 анод (сетка); 2 – коллектор ионов; 3 – катод [12, с. 114]

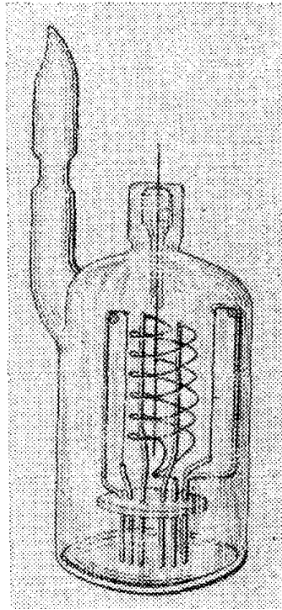


Рис. 116. Электронный ионизационный манометр Байярда-Альперта для измерения сверхнизких давлений [2, с. 199]

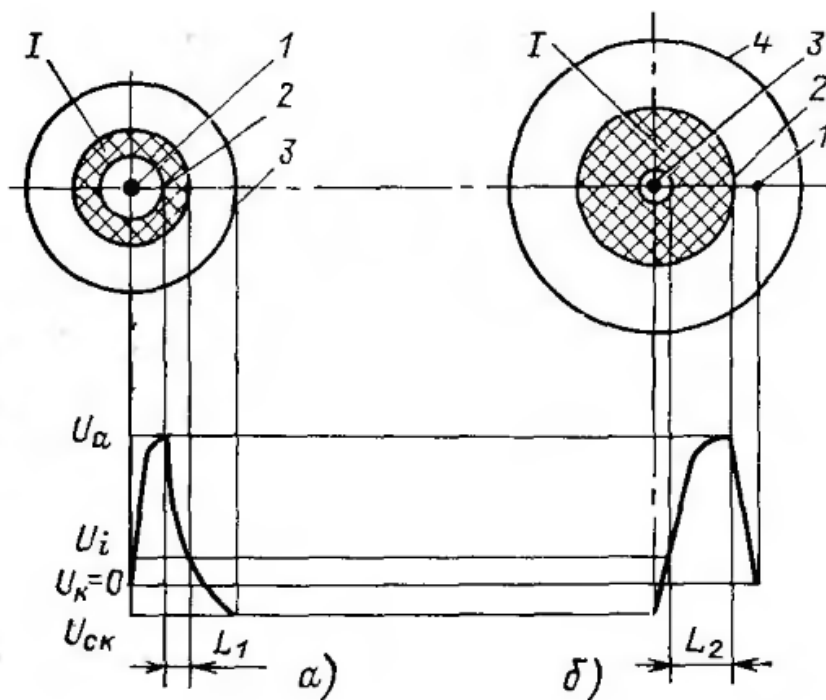


Рис. 117. Распределение потенциалов в ионизационных преобразователях с цилиндрическим (а) и осевым (б) коллекторами: 1 – катод; 2 – анод; 3 – коллектор; 4 – экран; U_{ck} , U_k , U_a – потенциалы коллектора, катода и анода относительно земли; U_i – потенциал ионизации газа; I – область полезной ионизации [28, с. 19]

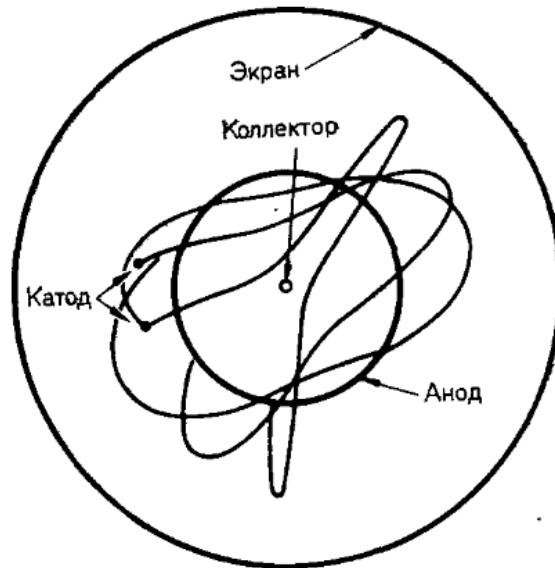


Рис. 118. Траектории для трех электронов, проходящих сеточный анод вакуумметра Байярда-Альперта под разными углами [27, с. 167]

Сетчатый анод 1 (рис. 115) имеет бóльший диаметр, чем в лампах с цилиндрическим коллектором, и расположен по оси преобразователя. Также по его оси расположен коллектор ионов 2, который представляет собой консольный вольфрамовый стержень диаметром не более 0,15 мм. Так как диаметр коллектора мал, а диаметр сетки сравнительно большой, на коллектор будет попадать лишь незначительная часть рентгеновских квантов, что значительно уменьшает паразитный фоновый ток. Таким образом, переход к осевому коллектору позволяет измерять давления примерно в 1000 раз мéньшие, чем преобразователями с цилиндрическим коллектором.

Однако замена цилиндрического коллектора на осевой снижает эффективность сбора ионов; частично это можно скомпенсировать увеличением диаметра анода. Кроме этого в манометрах Байярда-Альперта более рационально распределено электрическое поле, что расширяет зону полезной ионизации (рис. 117). Траектории движения электронов представлены на рис. 118 и 119.

Таким образом, если чувствительность вакуумметра Байярда-Альперта по сравнению с преобразователями с цилиндрическим коллектором снижается всего в 2 – 3 раза, паразитный фоновый ток уменьшается в сотни раз.

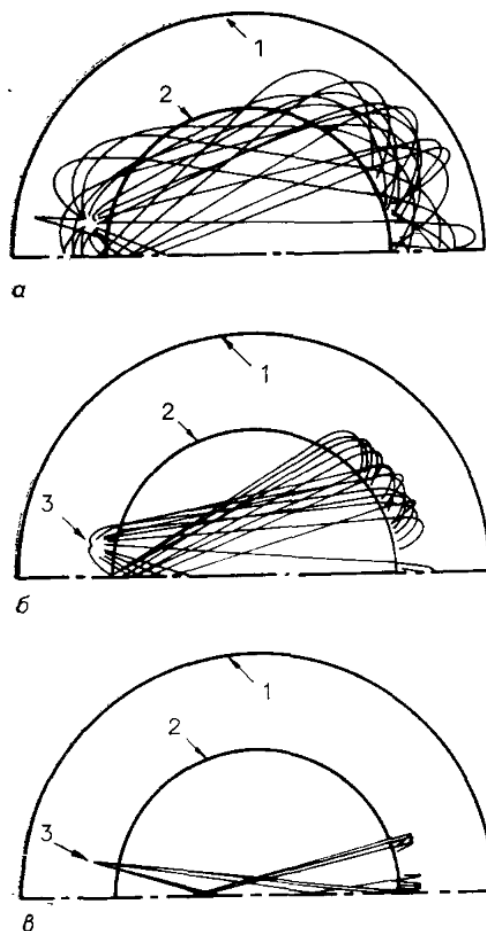


Рис. 119. Траектории электронов, пересекающих сеточное пространство вакуумметра Байярда-Альперта, в зависимости от распределения потенциалов электродов. 1 – экран; 2 – сетчатый анод; 3 – катод. а) – потенциал анода относительно экрана $V_{2-1} = 120 \text{ В}$; потенциал катода относительно экрана $V_{3-1} = 20 \text{ В}$; б) – $V_{2-1} = 250 \text{ В}$; $V_{3-1} = 150 \text{ В}$; в) – $V_{2-1} = 370 \text{ В}$; $V_{3-1} = 270 \text{ В}$ [27, с. 168]

Ещё больше повысить чувствительность датчиков с осевым коллектором можно, закрыв торцы сетчатого анода сетчатыми же пластинами, что будет препятствовать выходу части ионов через эти торцы (рис. 105г). Кроме того, вокруг прямого коллектора при работе датчика образуется положительный пространственный заряд, который экранирует его от ионов; чтобы снизить этот эффект, предложено делать форму коллектора более сложной – рис. 120. Это может повысить чувствительность вакуумметра до 50%. Однако изготовление таких коллекторов крайне нетехнологично.

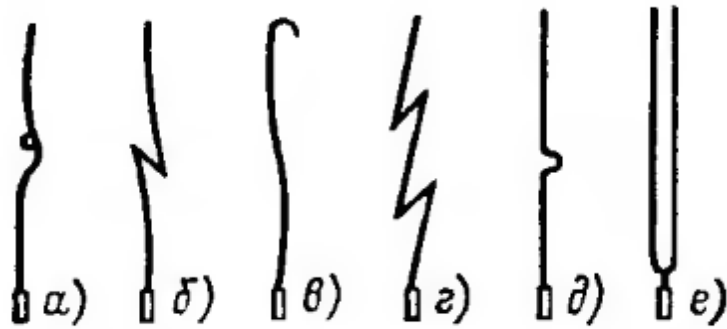


Рис. 120. Формы коллектора, обеспечивающие повышение чувствительности преобразователя с осевым коллектором [28, с. 21]

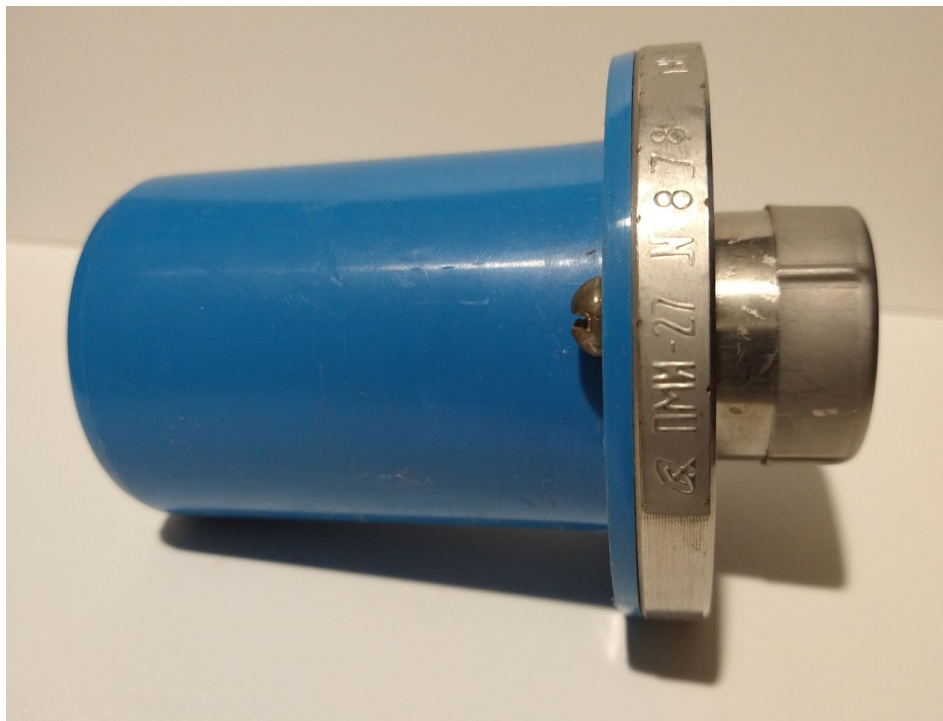


Рис. 121. Ионизационный манометрический преобразователь ПМИ-27 (зачехлённый) [фото автора]

Одним из самых распространённых в нашей стране преобразователей с осевым коллектором является датчик ПМИ-27 – рис. 121 и 122. Он выполнен по схеме с закрытыми торцами сетки (рис. 105г), как манометр Байярда-Альперта (для измерения высокого и сверхвысокого

вакуума), и совмещён с прямопролётным вакуумметром (для измерения сравнительно высоких давлений). Вокруг электродной системы расположен цилиндрический электрод, который электрически изолирован от корпуса. В преобразователе имеются два катода – вольфрамовый (для давлений $< 10^{-2}$ Па) и иридиевый с покрытием из оксида иттрия (для давлений $> 10^{-2}$ Па). Последний при измерении низких давлений имеет нулевой потенциал и выполняет функцию электростатического экрана. При давлениях $> 10^{-2}$ Па вакуумметр переходит в режим прямопролётного вакуумметра, иридиевый катод выполняет теперь роль анода, для чего на него подаётся ускоряющее напряжение, а коллектором становится сетка.



Рис. 122. Ионизационный манометрический преобразователь с осевым коллектором ПМИ-27 (в рабочем состоянии) [фото автора]



Рис. 123. Вакуумметр ионизационный ВИ-14
[<http://vacuum-systems.ru/vi14.php>]

Преобразователи ПМИ-27 входят в комплект ионизационных вакуумметров ВИ-14 (рис. 123).

Некоторые современные датчики Байярда-Альперта, комбинированные с манометром Пирани, представлены на рис. 124 и 125.



Рис. 124. Вакуумный датчик Байярда-Альперта + Пирани Leybold IONVAC [<https://vacuumpro.ru/vakuummetr/leybold/ionvac>]



Рис. 125. Вакуумные датчики Байярда-Альперта + Пирани Agilent FRG [https://vacuumpro.ru/vakuummeter/agilent/frg]

v18a § 5. Ионизационные вакуумметры специальных типов

Датчики с дополнительным электродом – отражателем. Для уменьшения угла вылета электронов между катодом К и стенкой помещается специальный отражатель (рефлектор) Е – рис. 126.

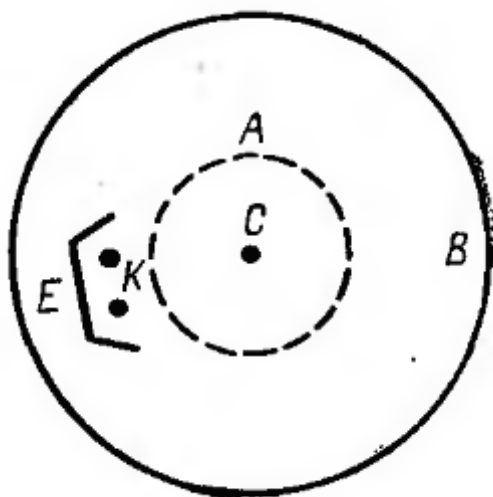


Рис. 126. Схема ионизационного преобразователя с осевым коллектором с отражателем: К – катод; А – анод; В – баллон; Е – экран (отражатель); С – коллектор ионов [28, с. 58]

Наличие отражателя предотвращает «уход» электронов на стенки и направляет их к аноду А, что повышает чувствительность и стабильность. Однако схема малотехнологична и создаёт некоторые трудности работы преобразователя.

Преобразователи с укороченным коллектором. Как уже было показано, уменьшение влияния фоновых токов приводит к сдвигу диапазона измерений в сторону более низких давлений. Это может быть получено при уменьшении площади облучаемого рентгеном катода. Уменьшать диаметр катода до бесконечности нельзя, поэтому было предложено катод укоротить (рис. 127).

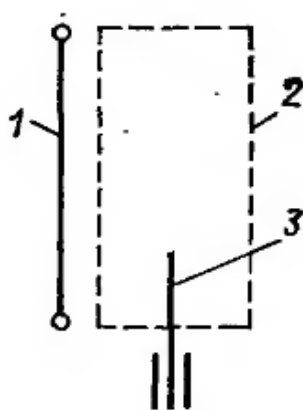


Рис. 127. Схема ионизационного преобразователя с укороченным ионным коллектором: 1 – катод; 2 – анод с закрытыми торцами; 3 – укороченный коллектор ионов [28, с. 75]

При этом, конечно, уменьшается чувствительность прибора, но и снижается доля фонового тока, что даёт общий положительный эффект. Нижний предел диапазона измерений составляет $\sim 10^{-9}$ Па.

Преобразователи с внешним коллектором. Использование внешнего коллектора, то есть – полностью выведенного за пределы анодного пространства, сводит на нет действие фонового излучения с анода. Преобразователь JG, разработанный Я. Грошковским [32], представлен на рис. 128. Закрытый цилиндрический сетчатый анод 1 в нижнем торце имеет отверстие, напротив которого находится коллектор 5 (вольфрам диаметром 2 мм и длиной 10 мм). Коллектор вставлен в манжету 6 (стекло или металл), экранирующую его от рентгеновского и других излучений.

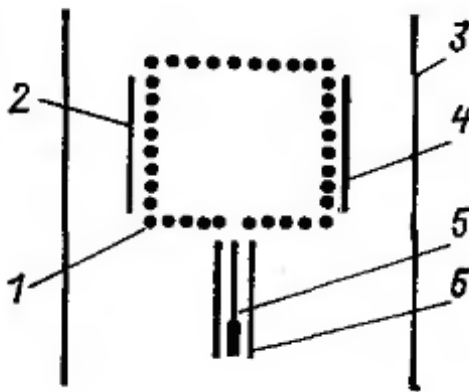


Рис. 128. Схема ионизационного преобразователя с внешним коллектором: 1 – анод; 2, 4 – катоды; 3 – стенка колбы; 5 – коллектор ионов; 6 – манжета [28, с. 76]

Вынесение коллектора из анодного пространства способствует более свободному многократному пролёту электронов и эффективной ионизации газовых молекул. Коллектор имеет большой отрицательный потенциал; это, а также наличие манжеты, способствует вытягиванию ионов через отверстие в торце анода и их эффективному сбору коллектором. Диапазон измерений примерно от $10^{-10} \div 10^{-9}$ Па до 10^{-3} Па. Одним из недостатков датчика является чувствительность к температурным эффектам.

Модуляционный вакуумметр Байярда Альперта. Общая схема модуляционных вакуумметров показана на рис. 105д, а принципиальная схема устройства – на рис. 129.

Предложен Редхэдом [33] в 1960 году. Это обычный вакуумметр Байярда-Альперта, в котором в пространстве ионизации параллельно оси анода расположен дополнительный электрод в виде тонкого консольного стержня (рис. 129).

В отличие от ранее рассмотренных и многих других модификаций ионных вакуумметров, где усовершенствования касались конструкции датчиков, в модуляционных вакуумметрах паразитные фоновые токи не устраняются, а учитываются уже при обработке результатов измерений. Таким образом, предполагаются соответствующие математические расчёты, что не вызывает затруднений при использовании компьютерной техники.

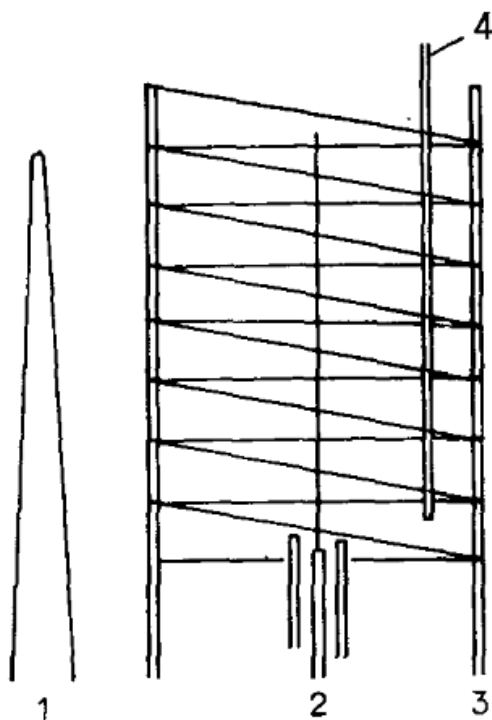


Рис. 129. Схема модуляционного вакуумметра Байярда-Альпсрта. 1 – катод; 2 – коллектор; 3 – анод; 4 – модулятор [27, с. 173]

В преобразователе Редхэда (рис. 129) модулятор 4 располагался напротив катода 1 в пространстве ионизации на расстоянии $2 \div 5$ мм от анода 3. В дальнейшем были предложены и другие конструкции. Ток на модуляторе не измеряется, но его потенциал может задаваться в каких-то пределах.

В простейшем случае при одном и том же значении давления измеряется коллекторный ток I_1 и I_2 при двух разных значениях потенциала модулятора (таких значений может быть и больше, при этом точность расчётов возрастает). Идея модуляционного вакуумметра основывается на допущении (которое подтверждается экспериментально), что паразитный фоновый ток, а также ток десорбции ионов (которая вызывается электронами), не зависят от потенциала модулятора. Тогда коллекторные токи можно представить как:

$$\begin{cases} I_1 = I_{u1} + I_{\phi 1} \\ I_2 = I_{u2} + I_{\phi 2} \end{cases}, \quad (32)$$

где I_{ui} – ток ионизации, $I_{\phi i}$ – фоновый ток. Обозначим (коэффициенты модуляции):

$$\alpha_i = \frac{I_{ui}}{I_u} \text{ при } I_{\phi i} \rightarrow 0 \text{ и } \beta_i = \frac{I_{\phi i}}{I_\phi} \text{ при } I_{ui} \rightarrow 0, \quad (33)$$

где I_u и I_ϕ – значения ионного и суммарного фонового тока для выбранного номинального напряжения на модуляторе. Тогда:

$$\begin{cases} I_1 = \alpha_1 I_u + \beta_1 I_\phi \\ I_2 = \alpha_2 I_u + \beta_2 I_\phi \end{cases}. \quad (34)$$

(Если имеется несколько разных значений потенциала модулятора, используется метод наименьших квадратов). Предполагается, что коэффициенты модуляции должны быть определены предварительно. Отсюда можно получить:

$$I_u = \frac{\beta_2 I_1 - \beta_1 I_2}{\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1} \text{ и } I_\phi = \frac{\alpha_1 I_2 - \alpha_2 I_1}{\alpha_1 \beta_2 - \alpha_2 \beta_1}. \quad (35)$$

Для определения модуляционных коэффициентов α_i измеряются коллекторные токи при $I_{\phi i} \ll I_i$, то есть – при сравнительно высоких давлениях. Для определения β_i требуется $I_{ui} \ll I_i$, то есть – экстремально низкие давления. что реализуется сложнее. Коэффициенты модуляции зависят от конструкции датчика, его рабочего режима и рода газа. Нижний предел модуляционного вакуумметра по абсолютному значению в 10 – 20 раз ниже одного для вакуумметра без модуляции. Для преобразователей с осевым коллектором нижний предел составляет примерно 10^{-9} Па, при этом чувствительность преобразователя может уменьшиться в 1,1 – 1,5 раза.

Схема Редхэда (рис. 129) является схемой с **положительной модуляцией**. В методе с **отрицательной модуляцией** на модулятор подаётся поочерёдно потенциал коллектора (практически – нулевой) и большой отрицательный (например – -150 В). Таким образом, бомбардировки модулятора электронами не происходит, следовательно – и отсутствует модуляция фотоэлектронного тока с коллектора и дополнительные десорбционные эффекты. Однако, чувствительность преобразователя ещё больше снижается.

В схеме преобразователя модуляционного вакуумметра с клеточным модулятором (рис. 130) на модулятор поочерёдно подаётся

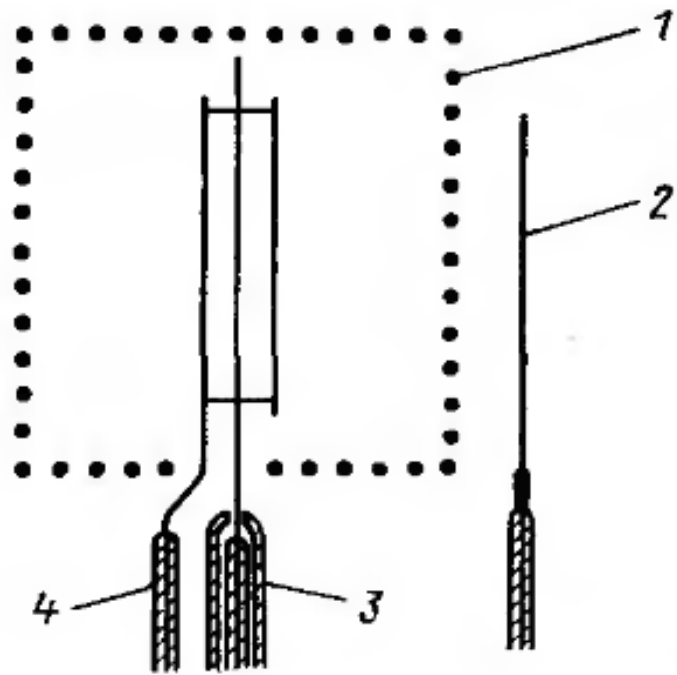


Рис. 130. Схема преобразователя модуляционного вакуумметра с клеточным модулятором. 1 – анод; 2 – катод; 3 – коллектор ионов; 4 – модулятор [28, с. 92]

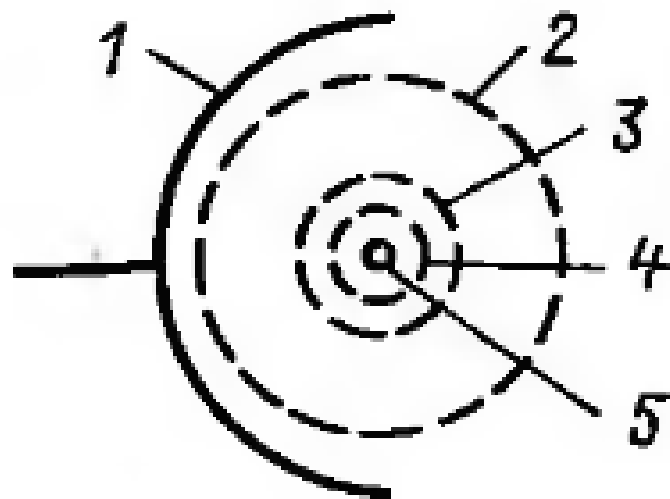


Рис. 131. Схема многосеточного ионизационного преобразователя с отрицательной модуляцией. 1 – катод; 2 – анод; 3 – экранирующая сетка; 4 – модулятор; 5 – коллектор [28, с. 93]



Рис. 132. Вакуумметр ионизационный образцовый ВИО-1
 [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fupload.metrologu.ru%2Fforum%2Fmonthly_12_2016%2Fpost-41312-0-22635900-1482311164.jpg&lr=192&pos=4&rpt=simage&source=serp&text=вакуумметр%20ионизационный%20образцовый%20вио-1]

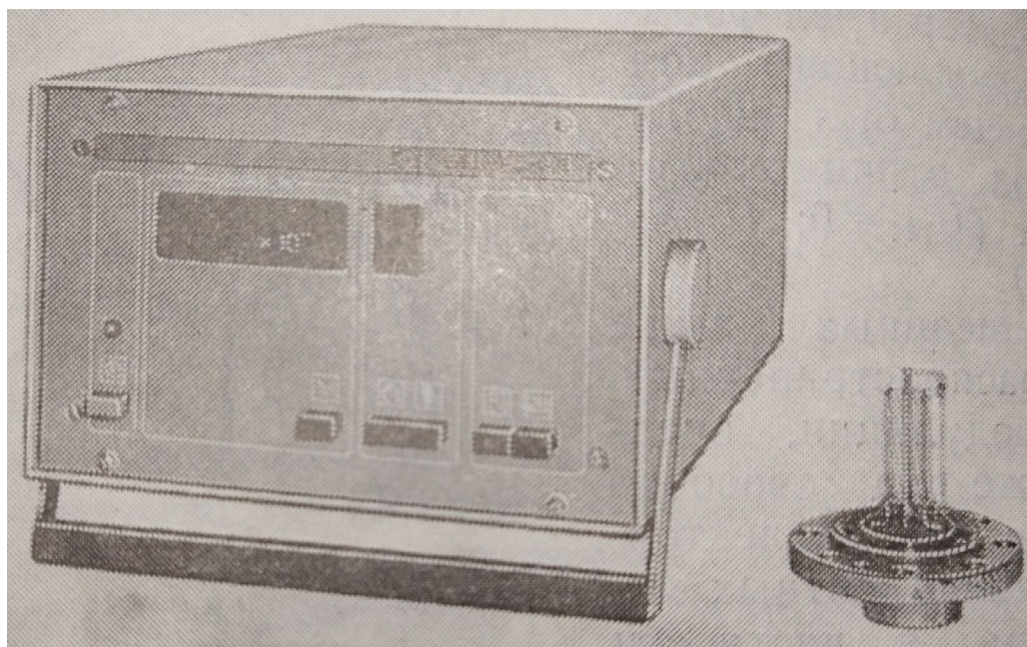


Рис. 133. Цифровой ионизационный вакуумметр ВИЦ-9/0-001 с открытым модуляционным преобразователем ПМИ-55 [1, с. 108]

потенциал катода и корпуса (то есть – нулевой). Торцовые сетки анода 1 модулятор 3 обеспечивает достаточную глубину модуляции, кроме того, модулятор перехватывает часть фотоэлектронов с коллектора. В данной схеме отсутствуют серьёзные искажения электрического поля. Но чувствительность датчика опять-таки остаётся небольшой.

В многосеточном ионизационном преобразователе с отрицательной модуляцией (рис. 131) вокруг соосных коллектора 5 и клеточного модулятора 4 помещена, также соосно, дополнительная экранирующая сетка 3 с низким отрицательным потенциалом (-10 В). При этом электроны с катода 1 при подаче на модулятор положительного потенциала тормозятся и не достигают его, то есть электроны устремляются практически только к аноду 2.

В нашей стране выпускались образцовый ионизационный вакуумметр ВИО-1 (рис. 132) и цифровой ионизационный вакуумметр ВИЦ-9/0-001 с открытым модуляционным преобразователем ПМИ-55 (рис. 133).

Экстракторные вакуумметры. Общая схема экстракторных вакуумметров показана на рис. 105е. Как и в вакуумметрах с внешним коллектором, последний вынесен за пределы анодного пространства, но, в отличие от них, в экстракторных вакуумметрах система извлечения ионов выполняет также функцию фокусирования пучка ионов. Одна из первых моделей – экстракторный вакуумметр Редхэда, – представлен на рис. 135, а его принципиальная схема – на рис. 134.

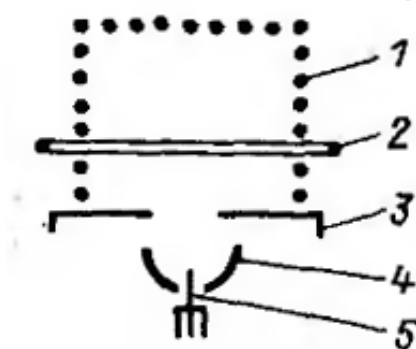


Рис. 134. Схема экстракторного преобразователя с прямым пролетом ионного пучка: 1 – анод; 2 – катод; 3 – экстрактор; 4 – рефlector; 5 – коллектор ионов [28, с. 80]

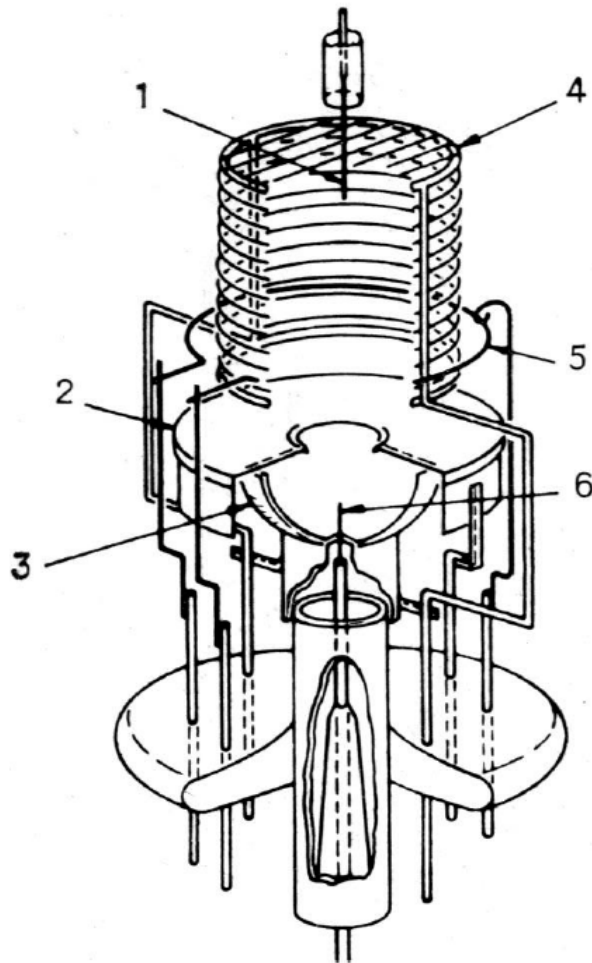


Рис. 135. Экстракторный вакуумметр Редхэда. 1 – модулятор; 2 – экран; 3 – отражатель ионов; 4 – анод; 5 – кольцевой катод; 6 – коллектор [27, с. 176]

Сетчатая анодная коробка 1 и охватывающий её кольцевой накаливаемый катод 2 соосны друг другу (рис. 134). Экстрактор 3 находится под потенциалом катода $+200\text{ В}$ извлекает пучок ионов из анодного пространства через отверстие, находящееся напротив тонкого короткого коллектора 5 и полусферического рефлятора (отражателя) 4. Последний фокусирует пучок ионов.

В конструкции Грошковского (рис. 136а) использован тот экспериментальный факт, что воздействие рентгеновского излучения может быть снижено почти на два порядка, если на коллектор будут попадать только лучи, испускаемые удалённым концом анода. Тонкий короткий коллектор помещён внутри стеклянного цилиндрического экрана, находящегося напротив отверстия в торце замкнутой цилиндрической

сетки (анода). Моделирование траекторий ионов для этого вакуумметра представлено на рис. 136б.

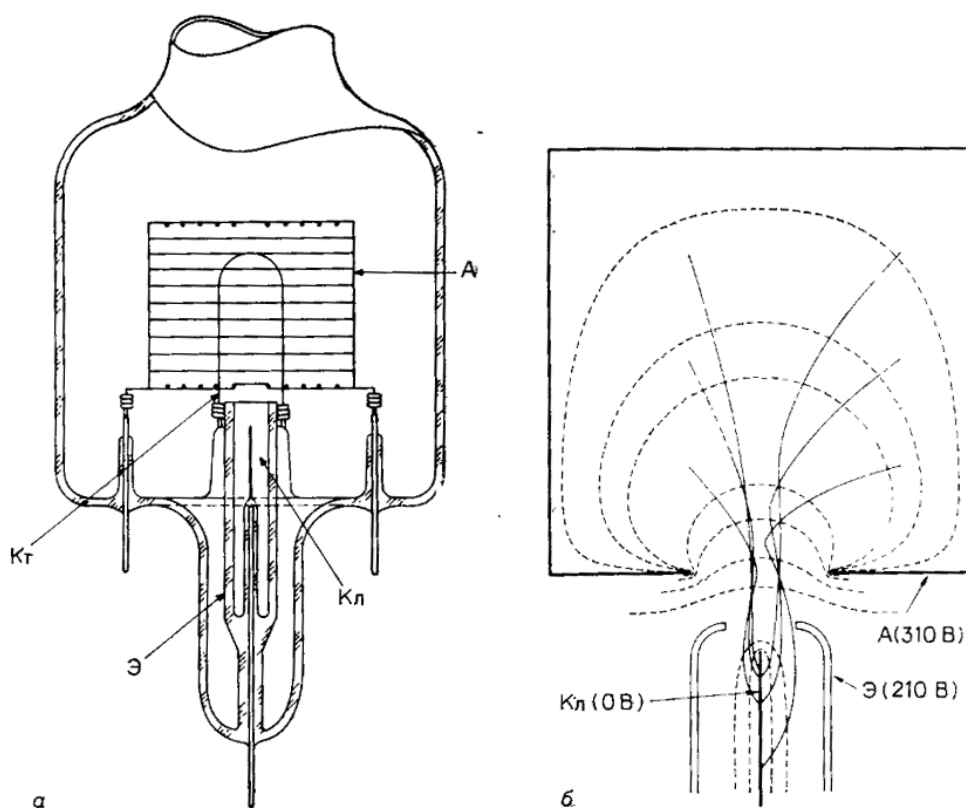


Рис. 136. Экстракторный вакуумметр Грошковского (а), распределение в нем электрического поля и траектории движения ионов (б). Кт — катод; Э — стеклянный экран; Кл — коллектор; А — анод [27, с. 177]

В вакуумметре Питтауэя (рис. 137; принципиальная схема –рис. 138) при экстракции осуществляется узкий ионный пучок. Экранирующая торцевая сетка 9 (рис. 137) электрически соединена с анодом 10. Экстрактор 2 (рис. 138) заземлён и имеет V-образное сечение. Он также служит барьером для высокоэнергетичных ионов. Рефлектор (отражатель) 3 состоит из наружного цилиндра и внутреннего конуса 5. Стеклянный шариковый изолятор 6 в основании коллектора экранирует от рентгеновского излучения стержень большого диаметра с укреплённым на нём тонким коллектором. Нижний предел давлений, измеряемый таким вакуумметром с модулятором, $\sim 10^{-12}$ Па.

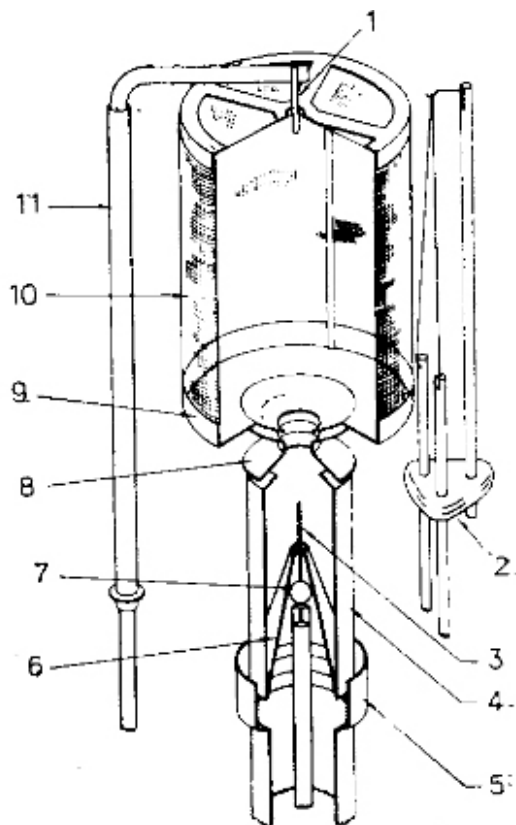


Рис. 137. Экстракторный вакуумметр Питтауэя. 1 – модулятор; 2 – катод; 3 – коллектор; 4 – цилиндрический рефlector; 5 – экран; 6 – конический рефlector; 7 – изолятор; 8 – экстрактор; 9 – торцевой экран; 10 – сеточный анод; 11 – кварцевая трубка [27, с. 179]

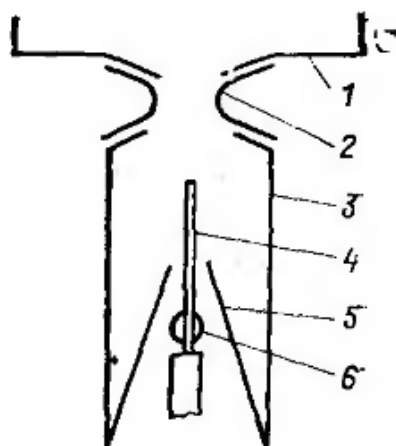


Рис. 138. Экстрагирующая система преобразователя Питтауэя с узким ионным пучком: 1 – экран; 2 – экстрактор; 3 – цилиндрический рефlector; 4 – коллектор ионов; 5 – конический рефlector; 6 – изолятор [28, с. 81]

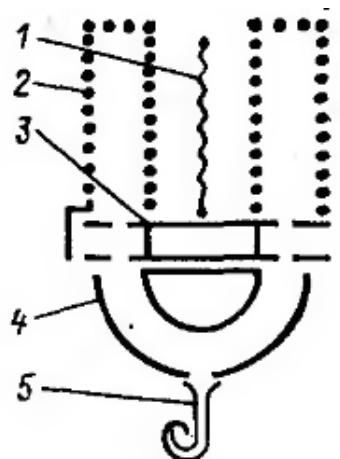


Рис. 139. Схема экстракторного преобразователя с электронным умножителем. 1 – катод; 2 – анод; 3 – коллиматор; 4 – дефлектор; 5 – электронный умножитель [28, с. 83]

В экстракторном преобразователе с электронным умножителем Блехшмидта (рис. 139) ионизационный объём находится между двумя concentрическими сеточными анодными цилиндрами 2. Катод 1 (вольфрам) натянут по оси этих цилиндров. Коллиматор 3, состоящий из двух заземлённых пластин, экстрагирует пучок ионов, который отклоняется в электростатическом поле двух concentрических полусфер дефлектора 4, внешняя из которых заземлена, а внутренняя имеет отрицательный потенциал. Электронный умножитель 5 собирает ионы и усиливает полученный сигнал

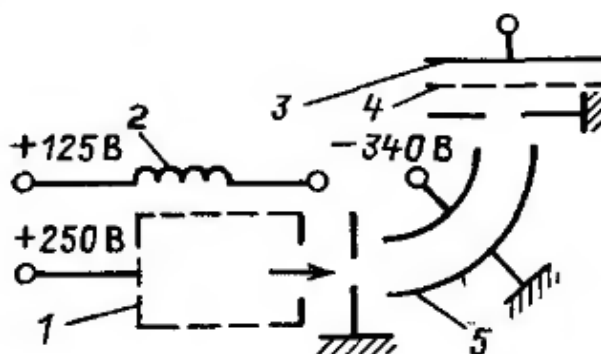


Рис. 140. Схема экстракторного преобразователя Гельмера и Гайварда с поворотом ионного пучка. 1 – анод; 2 – катод; 3 – коллектор ионов; 4 – супрессор (с потенциалом -100 В); 5 – дефлектор [28, с. 82]

Вакуумметр Гельмера и Гайварда с криволинейным пучком ионов (рис. 105) обеспечивает их эффективное улавливание. Это достигается отклонением пучка ионов на 90° электростатическим полем цилиндрического дефлектора 5 и направлением его через заземлённый экран на коллектор 3 (перед ним может быть установлена супрессорная сетка 4). Коллектор полностью закрыт от рентгеновского и ультрафиолетового излучения.

Супрессорные ионизационные преобразователи. Общая схема супрессорных вакуумметров показана на рис. 105з. Супрессорный вакуумметр Шумана представлен на рис. 141, принципиальная схема – на рис. 142.

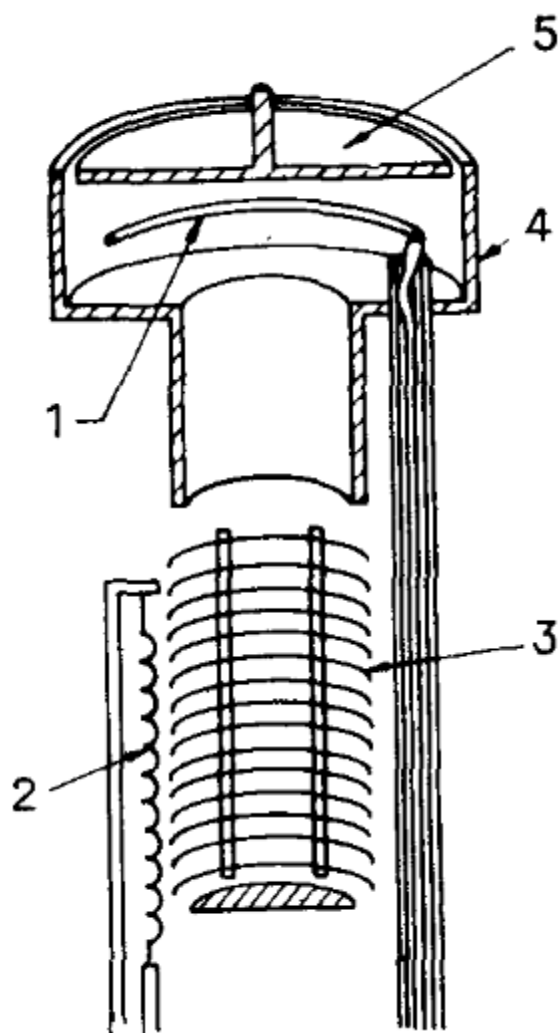


Рис. 141. Схема супрессорного вакуумметра Шумана. 1 – супрессор; 2 – катод; 3 – анод; 4 – экран; 5 – коллектор [27, с. 175]

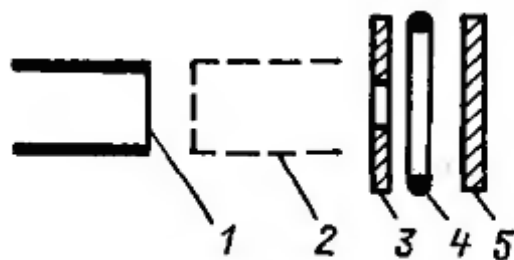


Рис. 142. Схема супрессорного преобразователя. 1 – катод; 2 – анод; 3 – экран; 4 – супрессор; 5 – коллектор ионов [28, с. 85]

Общий принцип супрессорных преобразователей сводится не к предотвращению появления фонового тока, а к торможению уже образованных фотоэлектронов. Это достигается введением специального электрода – супрессора, имеющего высокий отрицательный потенциал (до -300 В). В вакуумметре Шумана супрессор имеет кольцевую форму. Нижний предел измерений был снижен до 10^{-9} Па .

Орбитронные ионизационные вакуумметры. Общая схема орбитронных вакуумметров показана на рис. 105ж. Орбитронный эффект позволяет существенно увеличить длины траекторий электронов и, следовательно, – чувствительность вакуумметра.

Один из первых орбитронных вакуумметров, – Майера и Херба, – представлен на рис. 144, принципиальная схема – на рис. 143.

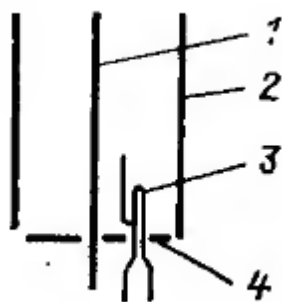


Рис. 143. Принципиальная схема орбитронного преобразователя. 1 – анод; 2 – коллектор ионов; 3 – катод, соединенный с отражателем; 4 – торцевой экран [28, с. 95]

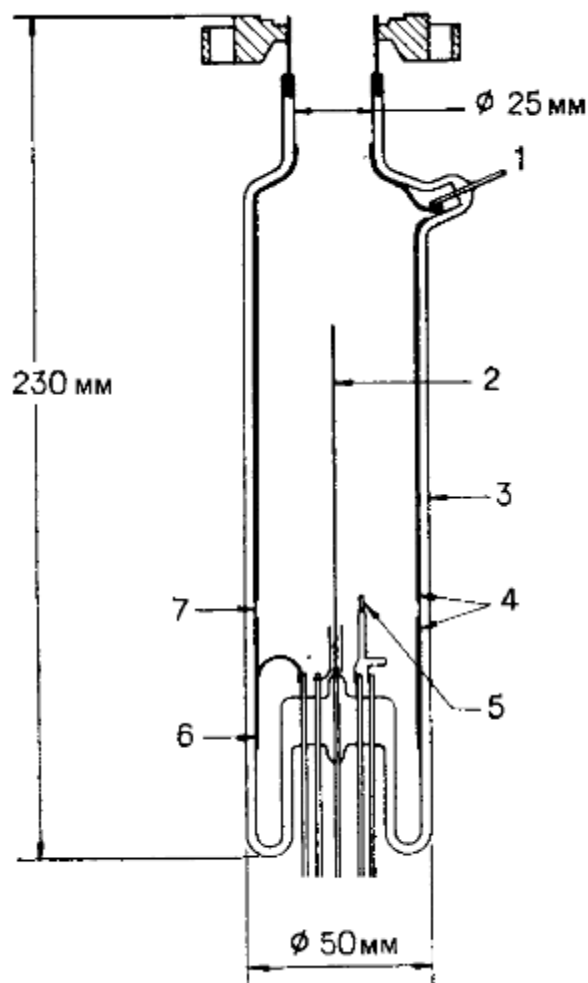


Рис. 144. Орбитронный вакуумметр Майера и Херба. 1 – коллектор ионов; 2 – анод из электропроводящего кварца (диаметр 0,23 мм); 3 – пирексовая трубка; 4 – проводящее покрытие; 5 – катод из торий-вольфрамовой проволоки (диаметр 0,25 мм); 6 – заземленный коллектор; 7 – изолирующий слой [27, с. 186]

В этом вакуумметре цилиндрический коллектор ионов 2 (рис. 143) с нулевым потенциалом и расположенный вдоль его оси тонкий анод 1, имеющий потенциал 500 В, создают электрическое поле, существенно удлиняющее путь ионизирующих электронов. Давление определяется ионным током коллектора. Рентгеновский ток соответствовал давлению 10^{-11} Па, то есть был пренебрежимо мал.

Схема орбитронного преобразователя Фитча показана на рис. 145. Уменьшение диаметра анода до 0,12 мм способствовало увеличению чувствительности. Два параллельные проволочные аноды обеспечивают орбитронный эффект.

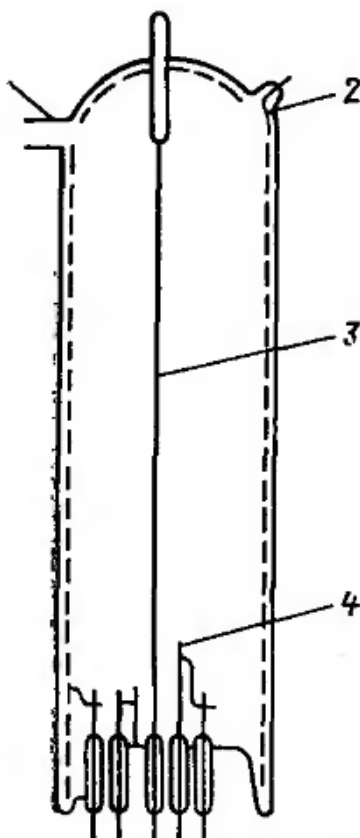


Рис. 145. Схема орбитронного преобразователя. 1 – корпус; 2 – проводящее покрытие (коллектор ионов); 3 – анод; 4 – катод [28, с. 96]

Ионизационные вакуумметры с магнитным полем (магнетронные вакуумметры с горячим катодом). Существенно увеличить длину траекторий электронов можно, наложив на систему магнитное поле.

В вакуумметре Лафферти (рис 146) на электрическое поле, создаваемое системой электродов, накладывается осесимметричное магнитное поле, параллельное оси анода. Цилиндрический анод имеет напряжение $300 \div 400 \text{ В}$, на его оси расположен накаливаемый катод $40 \div 50 \text{ В}$. Последний сверху и снизу прикрыт двумя пластинами: экранирующая 5 (потенциал $30 \div 40 \text{ В}$) и коллектор ионов 1.

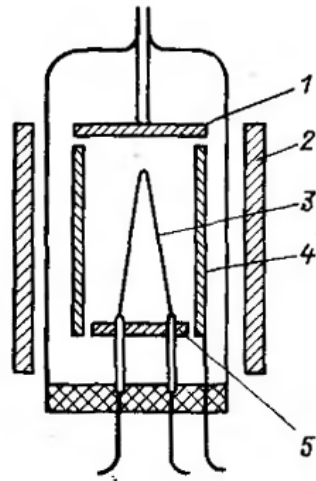


Рис. 146. Схема преобразователя магнетронного термоэлектронного вакуумметра конструкции Лафферти. 1 – коллектор ионов; 2 – магнит; 3 – катод; 4 – анод; 5 – экран [28, с. 98]

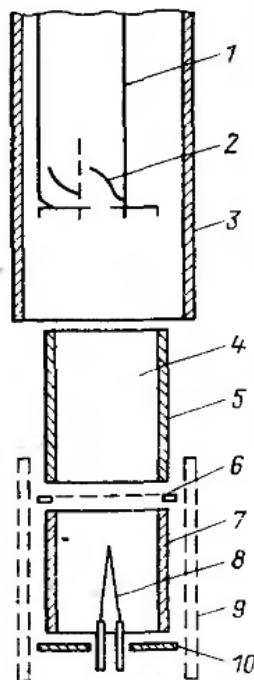


Рис. 147. Схема преобразователя магнетронного термоэлектронного вакуумметра с электронным умножителем. 1 – электронный умножитель; 2 – первый динод умножителя; 3 – экран умножителя; 4 – система электростатических линз; 5 – фокусирующий экран; 6 – ускоряющая торцевая сетка; 7 – анод; 8 – катод; 9 – магнит; 10 – экран [28, с. 99]

По теоретическим оценкам нижний предел диапазона магнетронного термоэлектронного вакуумметра может составлять $10^{-12} \div 10^{-11}$ Па; для измерения очень малых токов, соответствующих этим давлениям, требуются электронные умножители. Преобразователь с таким умножителем представлен на рис. 147.

v19 Глава 4. МАГНИТНЫЕ ЭЛЕКТРОРАЗРЯДНЫЕ И ДРУГИЕ ВАКУУММЕТРЫ

v20 § 1. Общие сведения о магнитных электроразрядных вакуумметрах

Ионизация газа в магнитных электроразрядных вакуумметрах происходит не за счет термоэлектронной эмиссии с поверхности горячего катода, а в условиях самостоятельного газового разряда, который происходит при перекрещивании магнитного и электрического полей. Электроды (в том числе – катод) при этом остаются «холодными». Это позволяет преодолеть многие недостатки электронных ионизационных вакуумметров, и во многих случаях магниторазрядные вакуумметры используются более широко. Диапазон измерений магнитных электроразрядных вакуумметров достаточно широк и не уступает по этому показателю ионизационным датчикам – от 10^{-11} Па (10^{-13} Торр) и ниже, и до 10^2 Па (1 Торр).

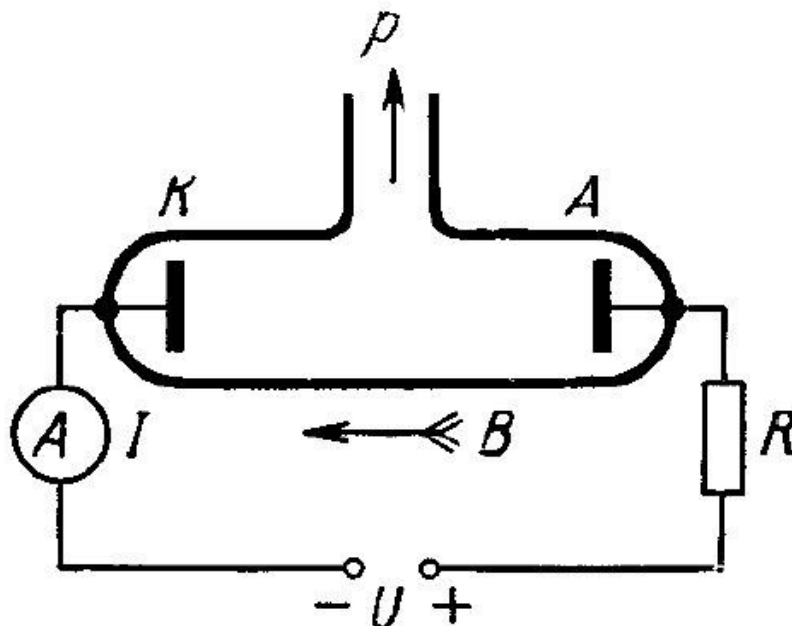


Рис. 148. Схема простейшего электроразрядного манометра (с тлеющим разрядом); внешнее магнитное поле индукции B повышает степень ионизации: A – анод; K – катод; R – ограничивающее сопротивление [3, с. 130]

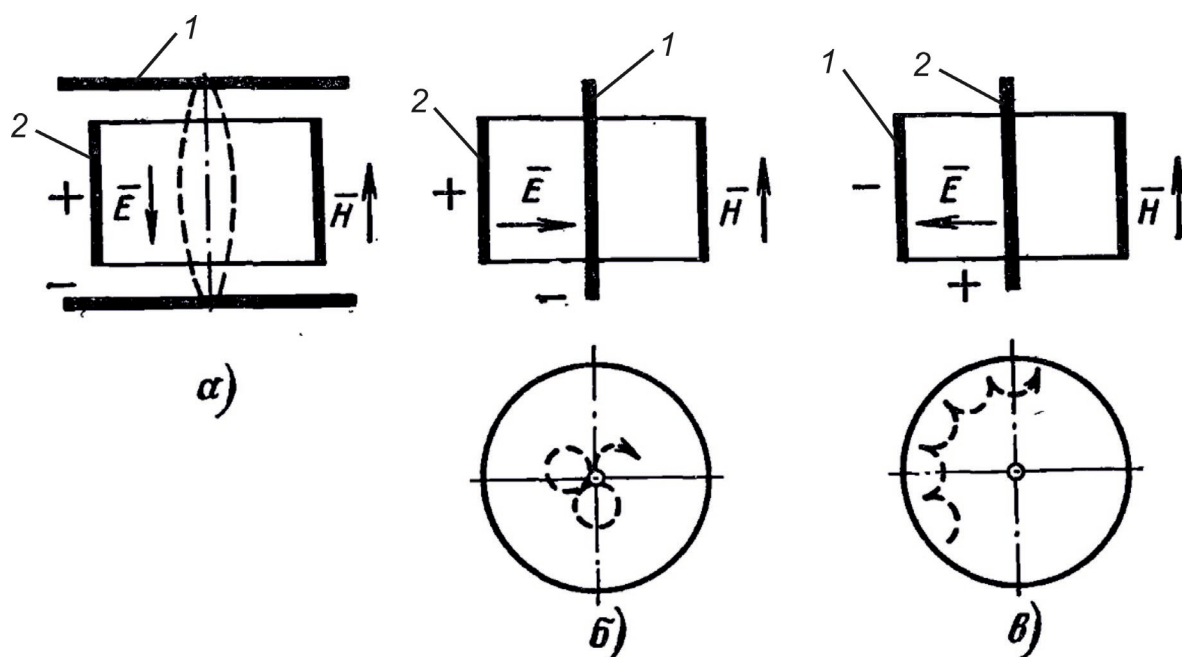


Рис. 149. Классификация магнитных электроразрядных манометров и траектории основного движения электронов в них. а) – манометр со взаимно параллельными электрическим и магнитным полями (манометр Пеннинга); б) – магнетронный; в) – инверсно-магнетронный манометры со взаимно перпендикулярными электрическими и магнитным полями; E – напряженность электрического поля; H – напряженность магнитного поля; 1 – катод; 2 – анод [2, с. 205]

Газовый разряд в области среднего и высокого вакуума будет зависеть от давления газа и, измеряя параметры этого разряда, можно получить значение давления при соответствующей градуировке. Даже в простейшем случае, в обычной газоразрядной трубке (рис. 148) можно получить тлеющий разряд, из параметров которого можно извлечь некоторую информацию о давлении. Можно измерить ток разряда; при давлениях выше 10 Torr – по свечению можно судить о давлении и составе газа. Разумеется, на практике это не используется.

Технически значимыми являются системы, в которых разряд стабилизирован и ионизация газовой среды достаточно эффективна. Во всех магниторазрядных вакуумметрах имеются только два основных электрода – анод и катод, создающие электрическое поле; вся система помещается во внешнее магнитное поле, создаваемое постоянным магнитом. Типичные значения напряжённости магнитного поля – $0,1 \div 0,2 \text{ Тл}$, электрического напряжения анод – катод – $2,5 \div 6 \text{ кВ}$.

Классификация магнитных электроразрядных вакуумметров основана на взаимном расположении магнитного и электрического полей (рис. 149). Выделяют три основных схемы: манометр со взаимно параллельными полями (манометр Пеннинга), магнетронный и инверсно-магнетронный манометры – со взаимно перпендикулярными полями.

Вакуумметры Пеннинга исторически являются первыми из магниторазрядных и в настоящее время находят малое применение. Остальные два типа вакуумметров имеют схожее строение: два коаксиальных электрода: по оси – тонкий проволочный и вокруг него – цилиндрический. В **магнетронных** преобразователях по центру идёт катод, а анод – цилиндрический; в **инверсно-магнетронном** – наоборот, анод проволочный, а катод – цилиндрический. Высокие значения напряжённостей полей и их перекрещение создают условия для стабильного газового разряда и большой степени ионизации газовой фазы. Прямой пролёт электронов на анод невозможен из-за высокой напряжённости магнитного поля. В ячейке Пеннинга электроны совершают в основном возвратно-поступательные движения вдоль оси, в магнетронных датчиках – по циклоиде, в инверсно-магнетронных – по гипоциклоиде (см. рис. 149). Между столкновениями электроны проходят громадные расстояния (в высоком вакууме – километры), ионизируя газ.

v21 § 2. Вакуумметры Пеннинга

Вакуумметр Пеннинга (рис. 150) представляет собой два плоскопараллельных катода 2, между которыми помещён ленточный кольцевой анод 1. Магнитное поле напряжённостью $\sim 0,04 \text{ Тл}$ направлено по оси этих электродов. Холодные катоды подвергаются ионной бомбардировке, что вызывает эмиссию электронов с их поверхности, которые под действием электрического поля 2 кВ ускоряются и, испытывая также действие магнитного поля совершают колебания, ионизируя газ до возникновения тлеющего разряда. Выходным электрическим сигналом служит общий электронный и ионный ток, измеряя который, можно судить о давлении в системе. При использовании цилиндрического анода (вначале он был кольцевым проволочным) можно измерить давление в диапазоне $1 \div 10^{-5} \text{ Па}$. В системе возникает рентгеновское излучение и, соответственно, – фоновый ток, но он будет зависеть

от давления. С другой стороны, из-за близкого расположения электродов может возникать автоэлектронная эмиссия, вызывающая паразитный ток.

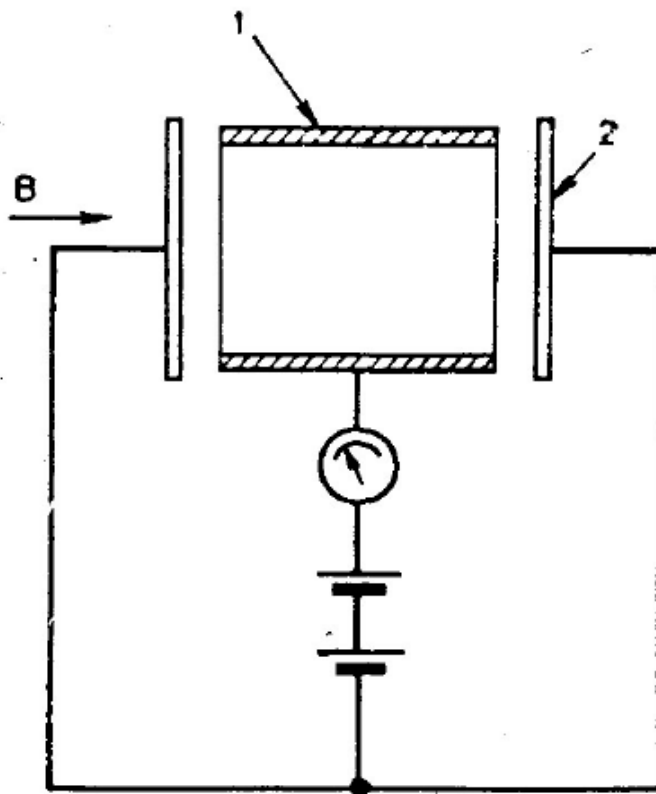


Рис. 150. Магнитный электроразрядный вакуумметр, построенный на основе пеннинговской ячейки. 1 – цилиндрический анод; 2 – катоды [27, с. 182]

Более подробно электрическая измерительная схема такого вакуумметра показана на рис. 151. Катодом здесь является металлический корпус лампы 1, а анод – металлический кольцевой; вдоль его оси направлено магнитное поле на постоянных магнитах. Через балластное сопротивление 3 на электроды подаётся положительное напряжение $2,5 \div 3$ кВ, обеспечивающее возникновение тлеющего разряда. Балластное сопротивление служит ограничителем напряжения, чтобы при сравнительно высоких давлениях тлеющий разряд не перешёл в дуговой.

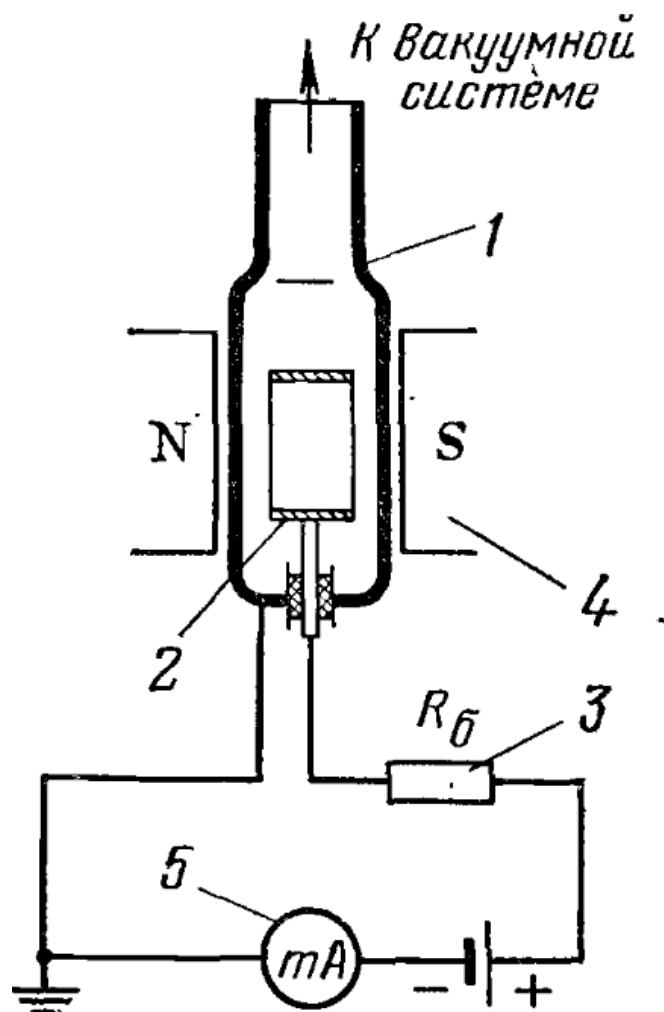


Рис. 151. Датчик магнитного электроразрядного манометра и упрощенная схема измерительного блока. 1 – корпус (катод); 2 – кольцевой анод; 3 – балластное сопротивление; 4 – постоянный магнит; 5 – измерительный прибор [2, с. 203]

Верхний предел измеряемых давлений может быть расширен до 10^2 Па (1 Торр) размещением в датчике дополнительного электрода (рис. 152). На верхнем пределе диапазона длина свободного пробега электронов сильно уменьшается, и они уже не набирают кинетической энергии, достаточной для ионизации газовых молекул. Поэтому ток разряда перестаёт зависеть от давления.

Дополнительный электрод 3 (рис. 152), по факту являющийся коллектором, представляет собой коробку с двумя отверстиями, которая помещается между двумя основными электродами. Коллектор

имеет самостоятельный изолированный электрический вывод через изолятор 4. Это позволяет измерять отдельно часть разрядного тока, приходящуюся на цепь коллектора. При давлениях меньше 1 Па (10^{-2} Торр) измеряется общий ток с коллектора и корпуса, при давлениях больше этой величины – только в цепи коллектора.

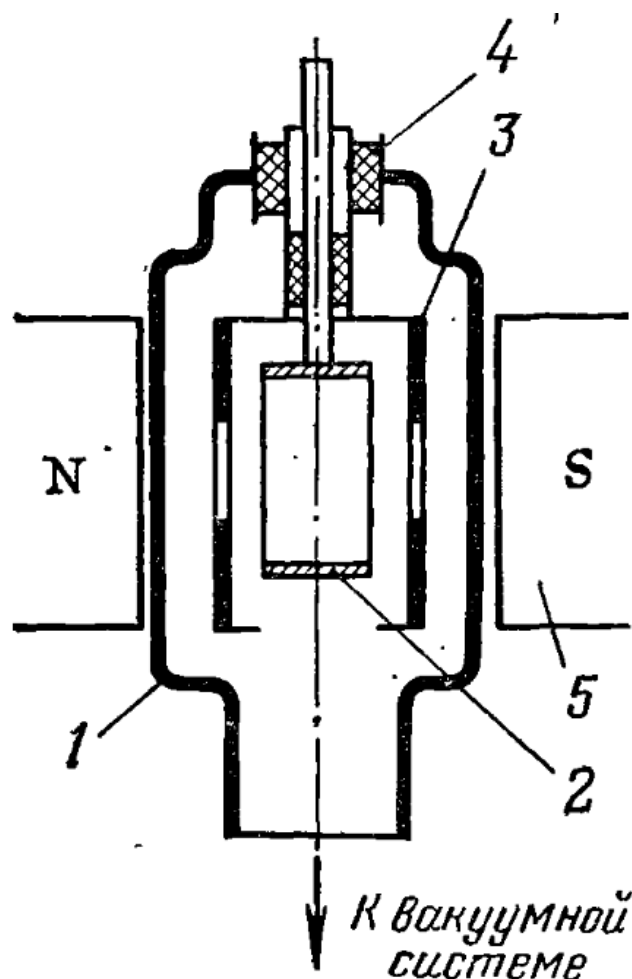


Рис. 152. Магнитный электроразрядный датчик с пределами измерения $6,65 \cdot 10^{-3} \div 133 \text{ Па}$ ($5 \cdot 10^{-5} \div 1 \text{ Торр}$). 1 – корпус; 2 – анод; 3 – коробчатый коллектор; 4 – изолятор; 5 – магнит [2, с. 206]

v22 § 3. Магнетронные вакуумметры

В магнетронных вакуумметрах траектории эмиттированных с поверхности электронов представляют собой витки циклоиды (эпициклоиды) – рис. 149б. Одновременно электроны колеблются вдоль оси под

тормозящим воздействием торцовых дисков. После столкновения с молекулой электрон теряет энергию и вращается вокруг катода с большим радиусом витка (при этом диаметр окружности циклоиды уменьшается). После многих соударений электрон постепенно приближается к аноду, пока не достигнет его.

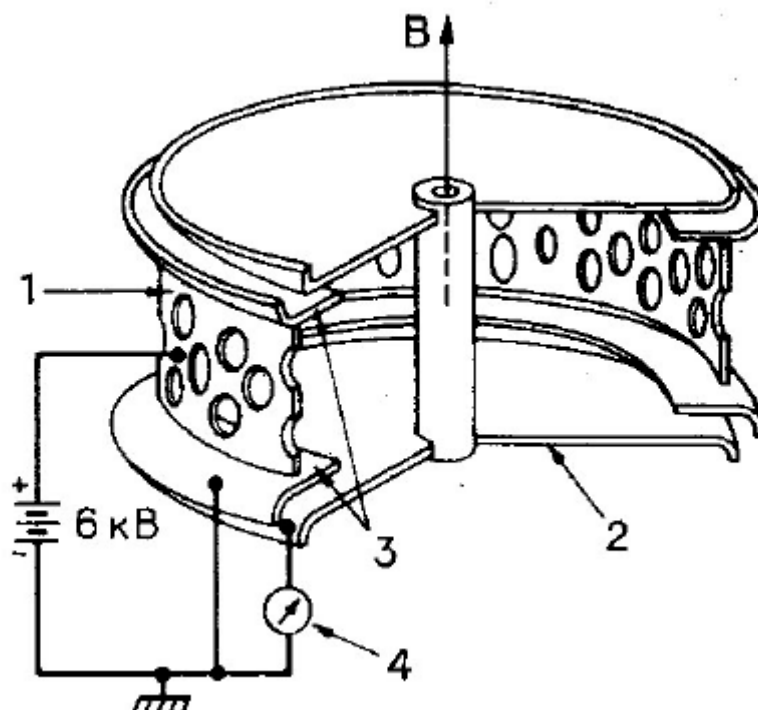


Рис. 153. Магнетронный вакуумметр Редхеда (с «холодным» катодом).
1 – анод; 2 – катод; 3 – вспомогательный катод; 4 – усилитель ионного тока [27, с. 183]

Магнетронный вакуумметр Редхэда (рис. 153) по устройству близок вакуумметру Пеннинга, в котором две катодные пластины 2 соединены coaxialным стержнем (который и обозначен на схеме 149б как катод). Между катодными пластинами и анодным кольцом расположены вспомогательные электроды 3, которые уменьшают автоэлектронную эмиссию. Для лучшей вакуумной проводимости анод 1 выполнен с отверстиями. Вакуумметр обладает высокой чувствительностью и практически линейной градуировочной характеристикой.

На рис. 154 показана схема магнетронного преобразователя с уменьшенными фоновыми токами. Их уменьшение достигается размещением вспомогательного заземлённого электрода 3 в промежутке

между анодом и катодом, где напряжённость электрического поля максимальна. В этом случае большая часть фонового тока переходит на корпус, не суммируясь с разрядным током.

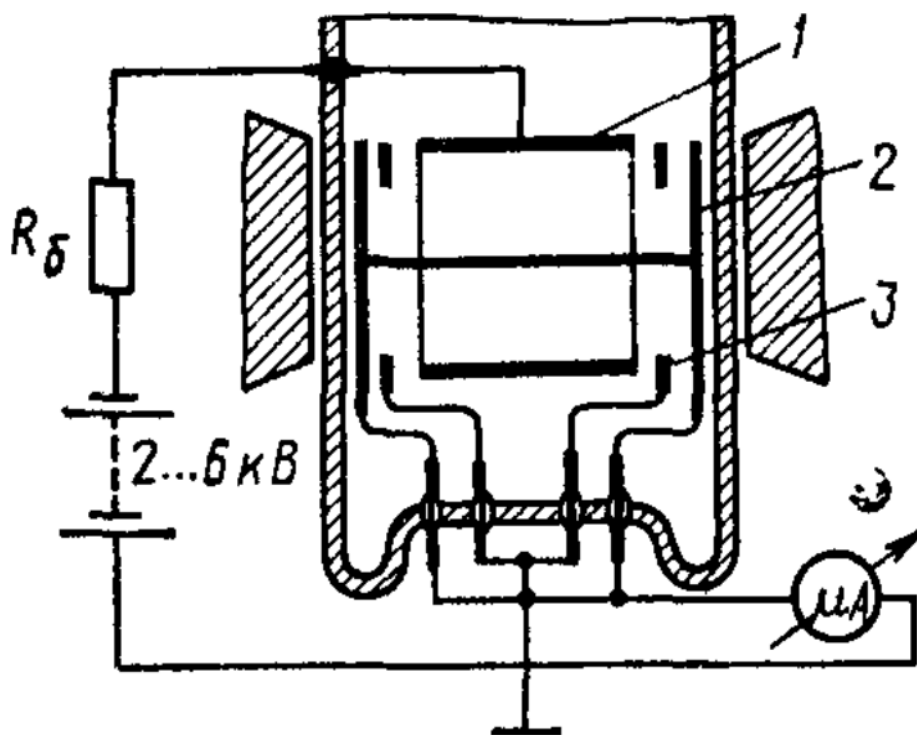


Рис. 154. Схема магнетронного преобразователя с уменьшенными фоновыми токами. 1 – анод; 2 – катод; 3 – вспомогательный заземлённый электрод [11, с. 150]

В нашей стране долгое время выпускался магнетронный преобразователь ПММ-27. В нём два параллельных катодных диска соединялись между собой вольфрамовой спиралью. Этот катод имел два вывода и мог прогреваться электротоком. Глеющий разряд мог поджигаться кратковременное пропусканием через спираль электрического тока. Электродная система снабжалась экранами. Напряжение $5 \pm 0,5 \text{ кВ}$, напряжённость магнитного поля $0,112 \div 0,118 \text{ Тл}$. Диапазон измерений $7 \cdot 10^{-11} \div 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

v23 § 4. Инверсно-магнетронные вакуумметры

В преобразователях этого типа вакуумметров электроны двигаются от наружного катода к осевому стержневому аноду по гипоциклоиде. После столкновений с молекулами газа радиус орбиты электрона уменьшается, то есть он смещается ближе к аноду. При этом диаметр окружности циклоиды увеличивается (рис. 155). Одновременно с этим электроны совершают колебания в осевом направлении; при приближении к торцовым дискам они замедляются и затем возвращаются обратно.

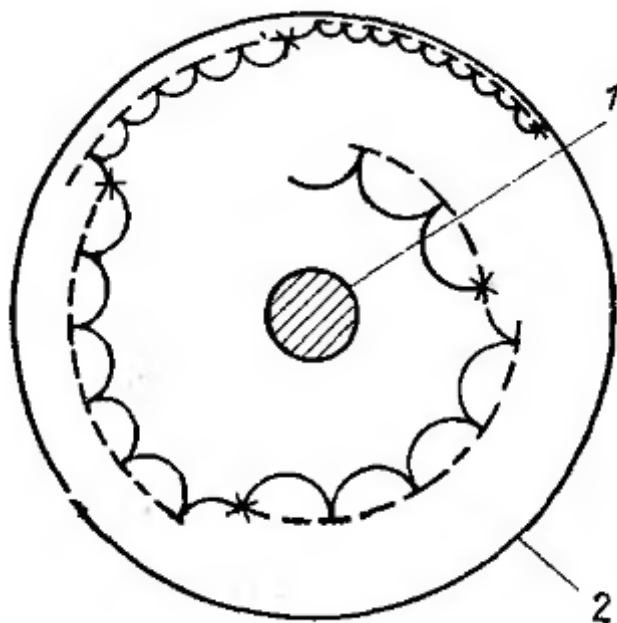


Рис. 155. Траектория движения электронов в плоскости, перпендикулярной оси электродной системы, инверсно-магнетронного преобразователя давления. 1 – анод; 2 – катод [28, с. 110]

Один из первых инверсно-магнетронных вакуумметров разработали Гобсон и Редхэд (рис. 156). Устройство имеет три электрода: стержневой анод 1, катод (он же коллектор ионов) 3 и вспомогательный катод 2. Катод 3 представляет собой полностью закрытый цилиндр с двумя отверстиями в торцах, через которые проходит анодный стержень. Вспомогательный катод 2 охватывает основной катод 3 и в месте

прохождения анода соединён с катодом 3 двумя трубками. Через них анод и проходит, причём трубки служат электростатической защитой от возникновения автоэлектронной эмиссии с поверхности коллектора. Рабочие параметры: напряжение 6 кВ , напряжённость магнитного поля $0,2\text{ Тл}$. Недостатки: некоторая нестабильность разряда и нелинейность градуировочной характеристики.

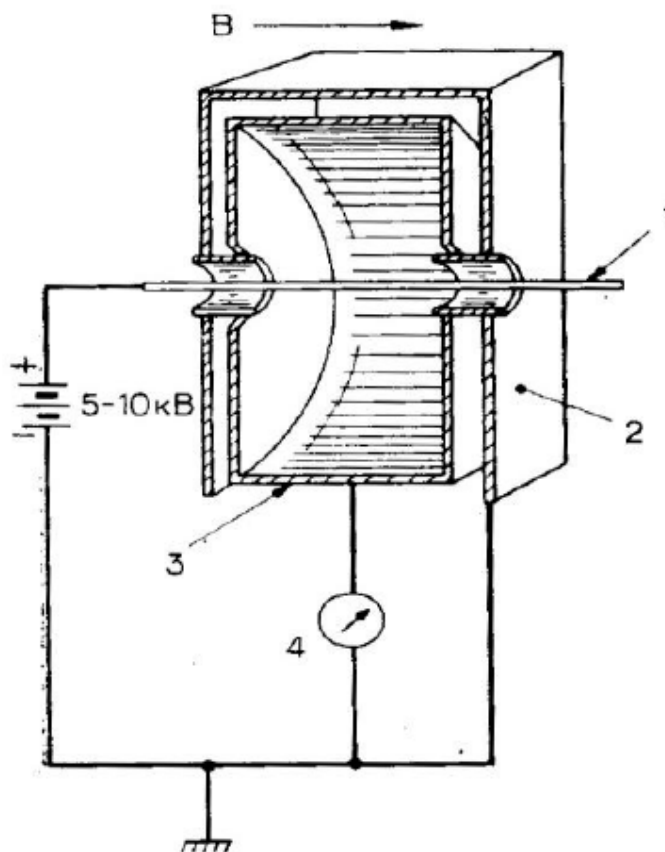


Рис. 156. Инверсно-магнетронный вакуумметр Гобсона и Редхэда. 1 – анод; 2 – вспомогательный катод; 3 – коллектор ионов; 4 – усилитель ионного тока [27, с. 183]

Ещё одна конструкция инверсно-магнетронного датчика показана на рис. 157. Анод 1 представляет собой вольфрамовый стержень. Экран 3 заземлён. Рабочие параметры: напряжение до 6 кВ , напряжённость магнитного поля $0,16\text{ Тл}$.

На рис. 158 представлен инверсно-магнетронный преобразователь ПММ-46, который работает в диапазоне

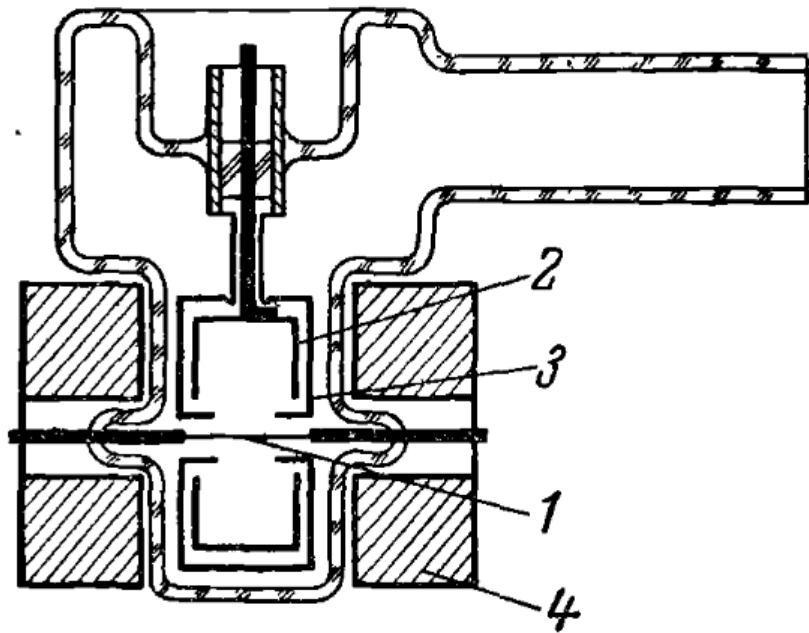


Рис. 157. Инверсно-магнетронный датчик. 1 – анод; 2 – цилиндрический катод; 3 – заземленный экран; 4 – постоянный магнит [2, с. 207]

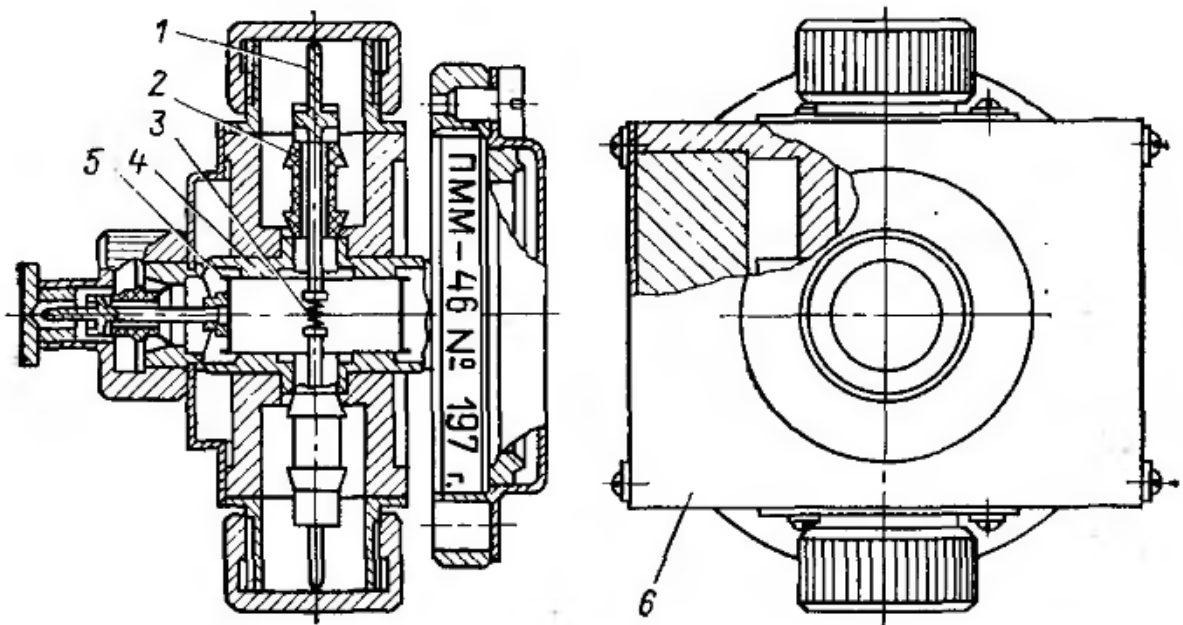


Рис. 158. Сверхвысоковакуумный магнитный электроразрядный преобразователь ПММ-46. 1 – анодные стержни; 2 – изоляторы; 3 – анодная спираль; 4 – торцевые экраны; 5 – катод; 6 – постоянный магнит [28, с. 117]

$2 \cdot 10^{-11} \div 1 \cdot 10^{-1} \text{ Па}$. Электродная система представляет собой обычную трёхэлектродную. Торцевые катодные крышки являются частью корпуса и имеют нулевой потенциал, что препятствует выходу электронов из ионного пространства и экранируют возможное появление фонового тока от автоэлектронной эмиссии с катода. Анод расположен по оси катода и состоит из двух стержней и находящейся между ними спирали из вольфрамовой проволоки. Датчик прогреваемый.

Основные технические данные промышленных магнитных электроразрядных преобразователей и вакуумметров приведены в табл. 16 и 17.

Таблица 16. Основные технические данные промышленных магнитных электроразрядных вакуумметров [9, с. 542]

Вакуумметр	Преобразователь	Диапазон измерений, Па	Погрешность измерений, %	Габаритные размеры, мм	
РВМ-1М	(С)	ПММ-22	± 60	100×158×315	
ВЭМБ-1		ПММ-28		245×177×310	
ВМБ-8		ПММ-32-1	-40...+80	240×158×335	
ВМБ-10		ПММ-38	± 60	240×158×388	
ВМБ-11	(СЦ)	ПММ-46	-40...+80	120×158×395	
ВМБ-12		ПММ-44	-50...+80	80×158×395	
ВМБ-14		ПММ-32-1	$10^{-7} \dots 1$	-40...+80	80×158×467
ВМЦБ-12	(Ц)		$10^{-6} \dots 0,1$	-50...+100	100×158×230
ВМБ-1/8-001	(СЦ)	ПММ-46	-40...+80	120×158×463	
ВТИ-1	(С)	ПММ-42	$10^{-5} \dots 0,1$	± 60	240×158×336
ВМБ-16	(Ц)	ПММ-46	$2 \cdot 10^{-11} \dots 7 \cdot 10^{-9}$	-40...+80	320×158×480
			$1 \cdot 10^{-2} \dots 1 \cdot 10^{-1}$	-55...+130	
ДВЭ-0/7-007	(-)	ПММ-32-1	$2 \cdot 10^{-7} \dots 1$	-50...+100	56×72×156
УКВ-3/7-001	(Ц)	ПММ-32-1	$2 \cdot 10^{-7} \dots 1$	-50...+100	212×128×490
			ПМТ-6-3			$1 \dots 4 \cdot 10^3$
ВТМ-2	(Ц)	ПММ-32-1	$1 \cdot 10^{-6} \dots 1,3 \cdot 10^{-1}$	-35...+60	360×180×400
			ПМТ-6-3	$1,3 \cdot 10^{-1} \dots 1,3;$ $1,3 \dots 3,9 \cdot 10^3$		-45...+85 -35...+60

Примечание. Вакуумметры и реле имеют аналоговый выход 0...10 В (кроме ВТ-3, ВТ-2А-П, ВТСО-1, РВБ-1). Тип отсчетного устройства указан в скобках: (С) – стрелочный; (СЦ) – светоцифровой; (Ц) – цифровой; (-) – без отсчетного устройства.

Таблица 17. Основные технические данные промышленных магнитных электроразрядных преобразователей [9, с. 542]

Преобразователь	$U_{a,k}$, кВ	B , Тл	Диапазон измерений, Па	Габаритные размеры, мм	Масса, кг	Соединение с вакуумной системой
ПММ-22	2,0	0,44	$1,3 \cdot 10^{-4} \dots 1,3$	$\varnothing 90 \times 80$	1,3	Фланцевое ($D_y = 50$ мм)
ПММ-28	2,5	0,045	$1,3 \cdot 10^{-3} \dots 1,3 \cdot 10^2$	$\varnothing 78 \times 118$	0,6	Фланцевое ($D_y = 20$ мм)
ПММ-32-1		0,11	$1,3 \cdot 10^{-7} \dots 1,3$	$\varnothing 90 \times 85$	0,9	Фланцевое ($D_y = 50$ мм)
ПММ-38	2,5	0,125	$1,3 \cdot 10^{-4} \dots 1,3$	$\varnothing 90 \times 85$	0,8	Фланцевое ($D_y = 50$ мм)
ПММ-42		0,11	$10^{-5} \dots 0,1$	$150 \times 150 \times 150$	2,0	Фланцевое ($D_y = 50$ мм)
ПММ-44		0,094	$1,3 \cdot 10^{-4} \dots 1,3$	$\varnothing 24 \times 83$	0,1	Штуцерное ($D_y = 16$ мм)
ПММ-46	5,5	0,18	$2 \cdot 10^{-11} \dots 0,13$	$95 \times 98 \times 106$	1,8	Фланцевое ($D_y = 50$ мм)

Условные обозначения: $U_{a,k}$ – напряжение между анодом и катодом; B – магнитная индукция.



Рис. 159. Ионизационный вакуумметр с холодным катодом Gatch SC1-N
[\[https://vactron.org/product/vakuummetry/vakuummetry-ulvac/ionizatsionnyy-vakuummetr-s-kholodnym-katodom-gatch-sc1-n/\]](https://vactron.org/product/vakuummetry/vakuummetry-ulvac/ionizatsionnyy-vakuummetr-s-kholodnym-katodom-gatch-sc1-n/)



Рис. 150. Ионизационные вакуумметры с холодным катодом по схеме Пеннинга

[https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Frosvaq.ru%2Fmedia%2Fwysiwyg%2Fleybold-penningvac.jpg&lr=192&pos=17&rpt=simage&source=serp&text=вакуумметр%20ионизационный%20образцовый%20вио-1]

Некоторые современные магнитные электроразрядные преобразователи зарубежных фирм показаны на рис. 159 и 160.

v24 § 5. Специальные типы магнитных электроразрядных вакуумметров

Основными недостатками и проблемами в работе магнитных электроразрядных вакуумметров являются:

1. Катодное распыление – эрозия поверхности металлического катода.
2. Утечка по изоляции. Причина – загрязнение при катодном распылении.
3. Сорбция газа в преобразователе.
4. Проблемы при зажигании и поддержании разряда
5. Нестабильность характеристик разряда.
6. Откачивающее действие преобразователей.

Рассмотренные ниже преобразователи во многих случаях позволяют снять некоторые из перечисленных проблем.

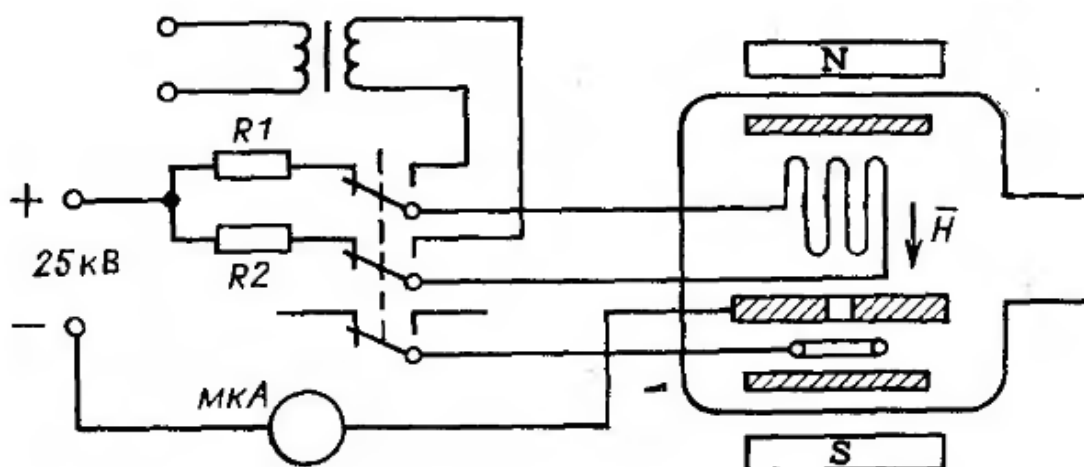


Рис. 151. Двухкамерный преобразователь ПММ-13М-4А и принципиальная схема его включения [28, с. 113]

Для расширения диапазона давлений, измеряемых преобразователями Пеннинга, применяют многокамерные конструкции. На рис. 151 показан преобразователь ПММ-13М-4А с двумя разрядными промежутками в одном корпусе, имеющими общую магнитную систему. Большая камера содержит анод в виде беличьего колеса и предназначена для измерения давлений, меньших 10^{-2} Па. Другая камера имеет меньшие размеры и содержит проволочный кольцевой анод, что позволяет измерять давления, большие 10^{-2} Па. Пределы измерения давлений составляют $10^{-5} \div 3$ Па.

«Преобразователь с секционированным катодом ПММ-8 (рис. 152) предназначен для измерения давлений в диапазоне $10^{-3} \div 10^2$ Па. В нём использовано явление перераспределения плотности разрядного тока по поверхности катода при увеличении давления. При высоких давлениях, когда дальнейшее увеличение разрядного тока с ростом давления не происходит вследствие влияния балластного сопротивления, плотность разрядного тока в центре катода по мере повышения давления уменьшается, а на периферийных участках катода, наоборот, увеличивается. Измеряя разрядные токи, поступающие на различные

участки секционированного катода, можно расширить верхнюю границу измеряемых давлений» [28, с. 114].

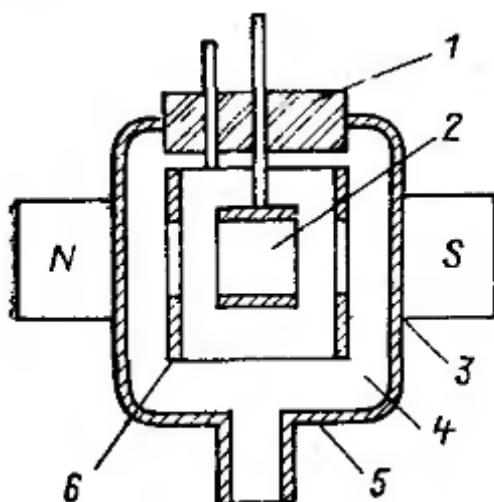


Рис. 152. Схема манометрического преобразователя с секционированным катодом. 1 – изолятор; 2 – анод; 3 – постоянный магнит; 4 – камера преобразователя; 5 – корпус преобразователя, служащий катодом; 6 – коллектор [28, с. 114]

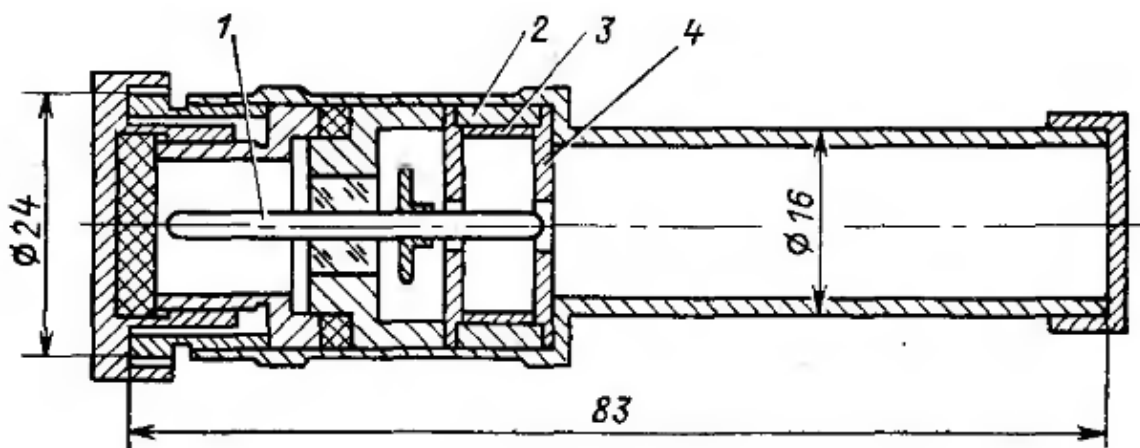


Рис. 153. Малогабаритный магнитный электроразрядный преобразователь ПММ-44. 1 – анод; 2 – цилиндрический магнит-катод; 3 – сменная катодная втулка; 4 – полюсные наконечники [28, с. 116]

Малогабаритный разборный преобразователь ПММ-44 (рис. 153) имеет рабочий диапазон $10^{-11} \div 1 \text{ Па}$. Магнитная система датчика является полым цилиндром и выполняет роль катода. Анод – стержневой; пространство ионизации закрыто никелевыми торцевыми пластинами.

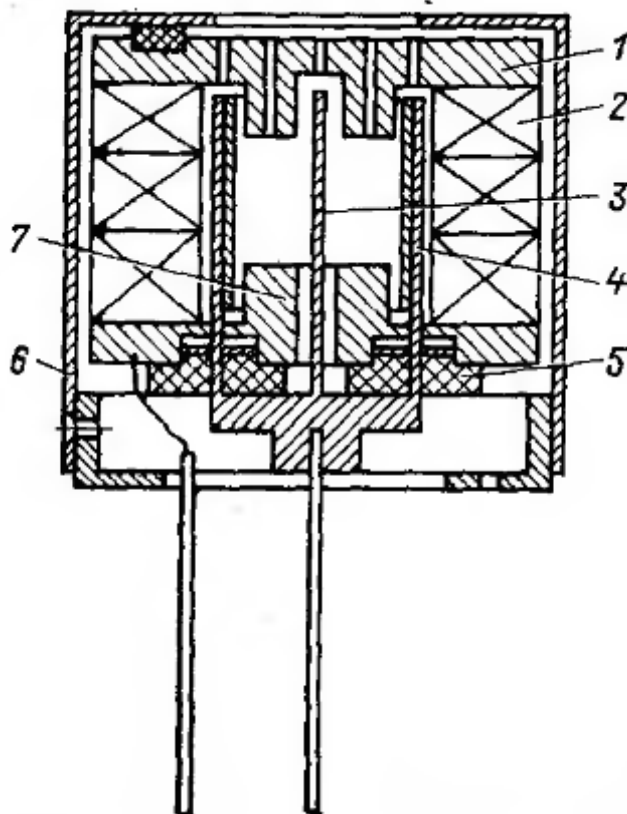


Рис. 154. Конструкция миматронного преобразователя. 1, 7 – полюсные наконечники; 2 – постоянный магнит; 3, 4 — цилиндрические аноды; 5 – керамический изолятор; 6 – корпус [28, с. 120]

На рис. 154 представлена конструкция миматронного преобразователя, в котором осуществлено параллельное соединение прямого и обратного магнетронов. Преобразователь обладает уменьшенным катодным распылением. В датчике установлено два коаксиальных цилиндрических анода и два плоских торцевых катода. Миматронный преобразователь имеет малые размеры, его разрядный ток в несколько раз больше тока инверсно-магнетронного вакуумметра. Рабочий диапазон от рабочий диапазон $10^{-6} \div 10^{-5} \text{ Па}$ до 10^{-1} Па .

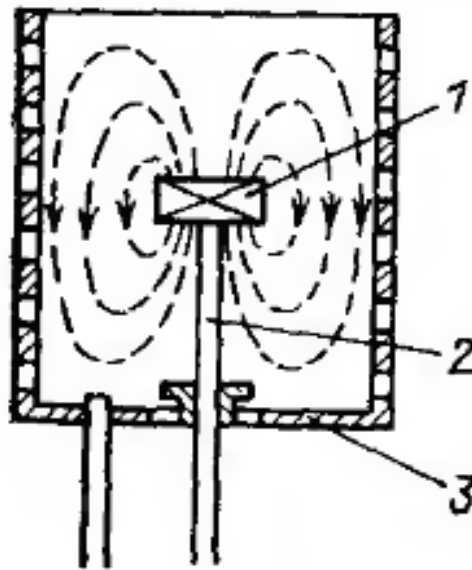


Рис. 155. Конструкция магнетронного преобразователя с неоднородным магнитным полем. 1 – катод – магнит; 2 – штанга – ввод; 3 – сетчатый цилиндр – анод [28, с. 121]

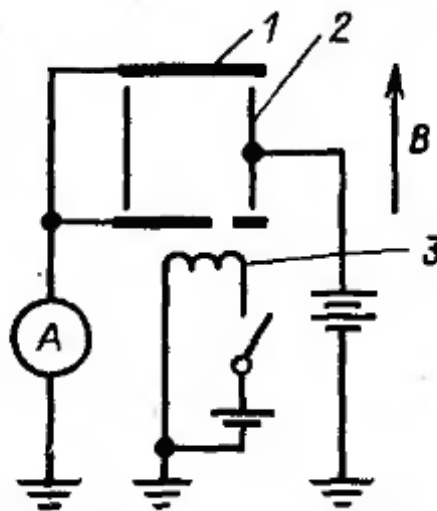


Рис. 156. Схема тригатронного преобразователя. 1 – катоды; 2 – анод; 3 – вспомогательный термокатод [28, с. 121]

«Конструкция магнетронного преобразователя с неоднородным магнитным полем (рис. 155) позволяет снизить сорбционные эффекты. Магнитное поле создано таблеточным магнитом (из сплава $Sm + Co$),

который служит одновременно катодом. Таблетка закреплена на изолированной штанге внутри анода (напряжение 2 кВ), выполненного в форме сетчатого цилиндра. Благодаря почти полностью открытой конструкции этого миниатюрного преобразователя обеспечивается максимально возможная проводимость между пространством ионизации и вакуумной камерой» [28, с. 121]. Область измерений прибора $10^{-5} \div 1 \text{ Па}$.

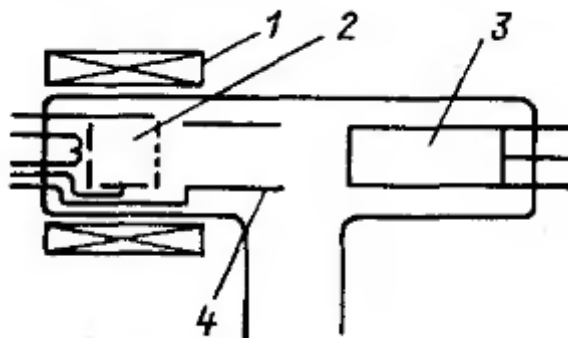


Рис. 157. Схема тригatronного преобразователя с электронным умножителем. 1 – постоянный магнит; 2 – электродная система; 3 – электронный умножитель; 4 – фокусирующая система [28, с. 122]

На рис. 156 и 157 показан триггерный разрядный вакуумметр (тригatron), в котором усовершенствован процесс розжига разряда. Преобразователь содержит цилиндрический анод и два торцевых катода. В одном из катодов просверлено небольшое отверстие, через которое накаливаемая вольфрамовая нить испускает импульсами электроны, что позволяет зажигать и поддерживать разряд вплоть до давлений $10^{-10} \div 10^{-11} \text{ Па}$. Однако преобразователь имел ряд недостатков, уменьшенных в конструкции рис. 157.

На рис. 158 – 159 представлен самоочищающийся преобразователь ПММ-28, входящий в комплект вакуумметра ВЭМБ-1. Преобразователь содержит два изолированных от корпуса кольцевых электрода, расположенных внутри камеры прямоугольной формы, с внешней стороны которой расположен постоянный магнит. Электрическая схема включения преобразователя ПММ-28 показана на рис. 159. Самоочищение происходит при подаче переменного высокого напряжения в противофазе.

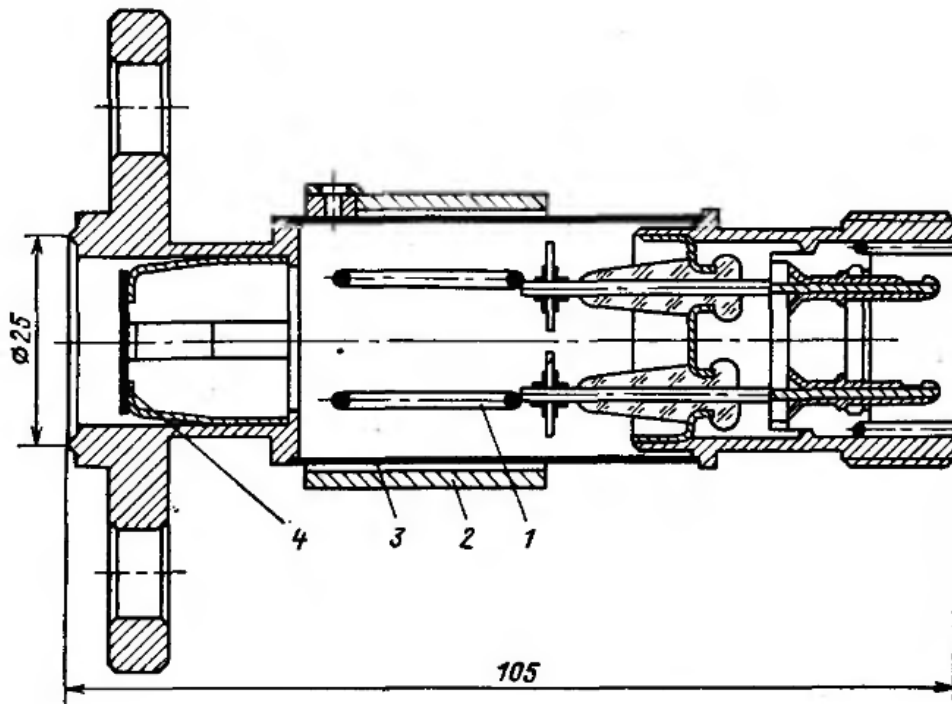


Рис. 158. Конструкция самоочищающегося преобразователя ПММ-28. 1 – кольцевые электроды; 2 – постоянный магнит; 3 – камера преобразователя; 4 – маслоотражатель [28, с. 124]

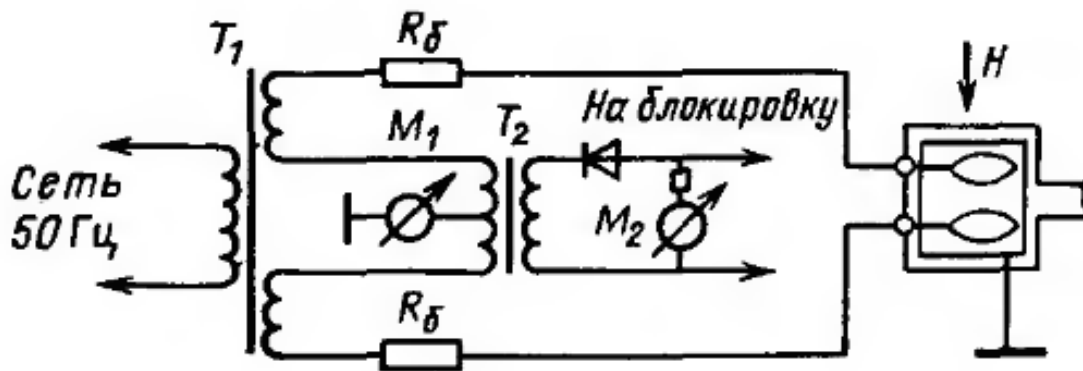


Рис. 159. Схема включения преобразователя ПММ-28 [28, с. 126]

Другой самоочищающийся преобразователь ПММ-38, работающий в комплекте вакуумметра ВМБ-10, показан на рис. 160. который может работать в двух различных режимах – магнетронном и инверсно-магнетронном, в зависимости от полярности напряжения на центральном электроде. Это способствует и самоочистке электродов,

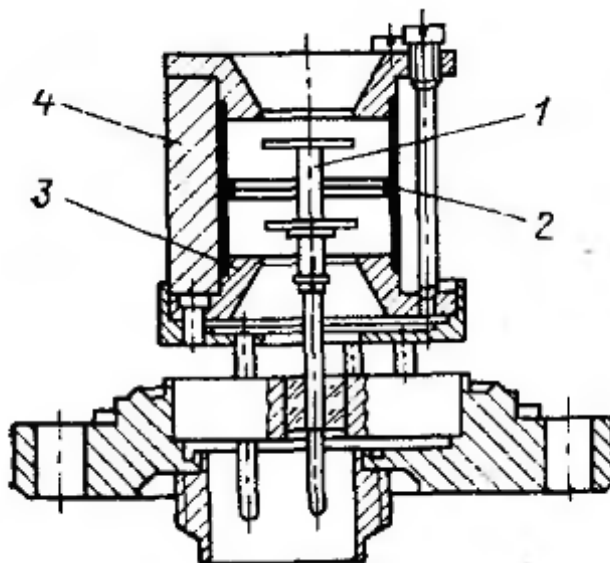


Рис. 160. Конструкция самоочищающегося преобразователя ПММ-38. 1 – внутренний электрод; 2 – внешний электрод; 3 – полюсные наконечники; 4 – постоянный магнит [28, с. 126]

которая происходит в результате бомбардировки ионами высокой энергии поверхности катода.

v25 § 6. Радиоизотопные вакуумметры

В радиоизотопных преобразователях газ ионизируется α -излучением радиоактивных изотопов: ^{226}Ra , ^{239}Pu , ^{238}Pu , ^3H и др; α -частицы – это ионы гелия He^{2+} . Их энергии вполне достаточно для ионизации газа. Радиоизотопные вакуумметры высокостабильны, поскольку α -излучение не зависит от температуры окружающей среды и химического воздействия агрессивных сред, и долговечны. С точки зрения метрологии они являются одними из лучших приборов для измерения вакуума, но опасны с точки зрения медицинской.

Радиоизотопный преобразователь (рис. 161) состоит из стержневого коллектора 1, цилиндрического анода 2 и радиоизотопного источника 3. Вылетающие из радиоизотопного источника α -частицы, соударяясь с молекулами остаточных газов, образующиеся в результате ионизации положительные ионы под действием разности потенциалов $\sim 50\text{ В}$ между анодом и коллектором образуют ионный ток, который пропорционален давлению.

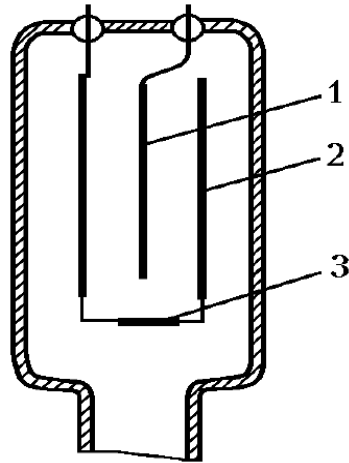


Рис. 161. Радиоизотопный преобразователь. 1 – коллектор (стержень); 2 – анод (цилиндр); 3 – радиоизотопный источник [12, с. 120]

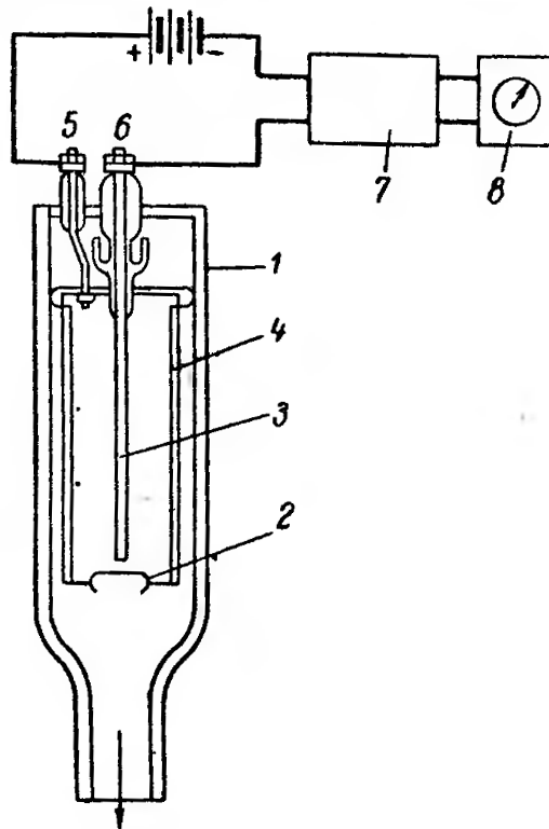


Рис. 162. Датчик радиоактивного манометра. 1 – корпус; 2 – радиоактивный источник; 3 – коллектор ионов; 4 – положительно заряженный электрод; 5 и 6 – изоляторы; 7 – усилитель; 8 – измерительный прибор. Стрелка указывает направление к вакуумной системе [4, с. 247]

Более подробная конструкция и принципиальная измерительная схема представлена на рис. 162. Диапазон рабочих давлений радиоизотопных преобразователей составляет $10^{-2} \div 10^5 \text{ Па}$. В настоящее время преобразователи не выпускаются по соображениям безопасности.

v26 § 7. Вязкостные и радиометрические вакуумметры

Измерение вакуума этими приборами основано на явлениях переноса – тепла, механического движения и т. д.

В **вязкостных** вакуумных манометрах ротор, подвешенный в высокочастотном магнитном поле, вращается с большой угловой скоростью $\sim 100000 \text{ об./мин.}$

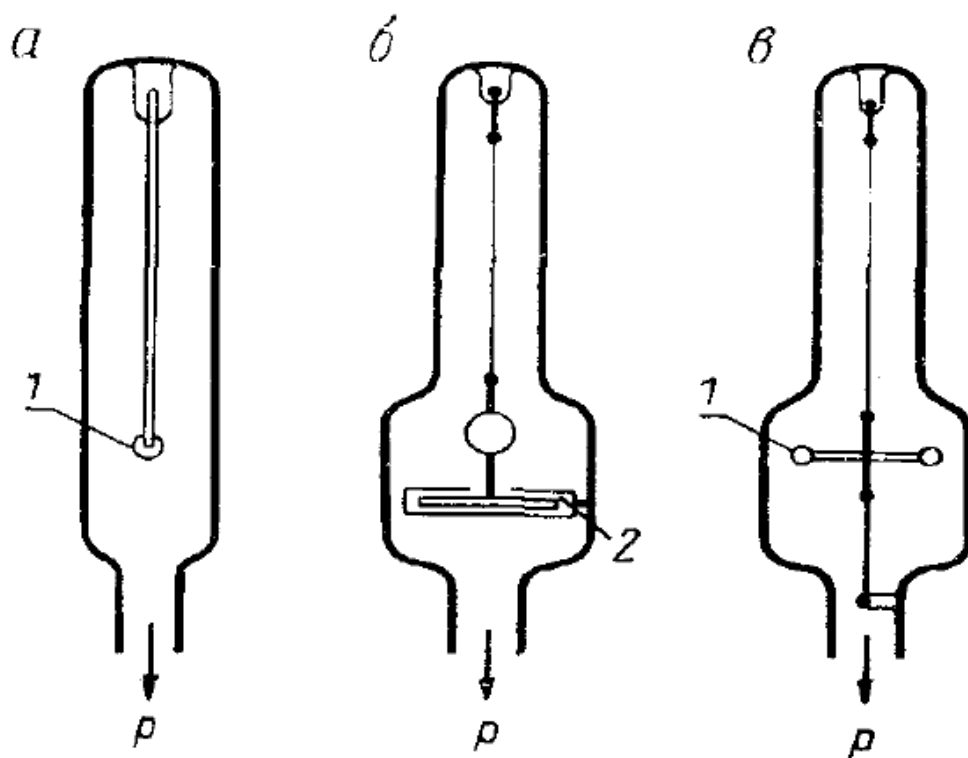


Рис. 163. Вязкостные манометры: (а) с качающимся стержнем; (б) с диском, совершающим крутильные колебания; (в) со стержнем, совершающим крутильные колебания: 1 – стальной шарик, служащий для приведения в колебательное движение подвижного элемента при помощи постоянного магнита; 2 – диск, тормозящийся под действием вязкости газа [3, с. 114]

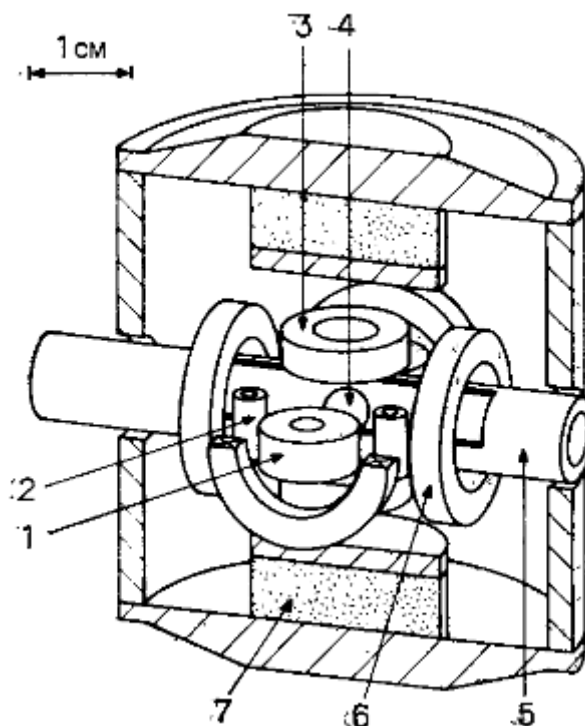


Рис. 164. Датчик вязкостного вакуумметра. Вращающийся ротор в виде шара удерживается магнитной подвеской. 1, 3 – чувствительные кольца для измерения и контроля осевого положения ротора; 2 – одно из четырех колец системы поперечного демпфирования; 4 – ротор (шарик); 5 – полый цилиндр, соединенный с вакуумной системой; 6 – одно из четырех рабочих колец; 7 – одни из двух постоянных магнитов [27, с. 190]

Варианты вакуумметров, где совершаются колебания на тонкой кварцевой нити, представлены на рис. 163.

Вращающимся ротором может выступать диск, шарик, стержень. Скорость вращения ротора, определяемая внешним полем, будет уменьшаться из-за вязкого трения в газовой фазе. Вязкостный вакуумметр с ротором в виде стального шарика, показан на рис. 164.

Диапазон вязкостных вакуумметров составляет $10^{-7} \div 10^{-2}$ Па.

Кинетомолекулярные манометры (рис. 165) основаны на переносе количества движения непосредственно молекулами газа, которые приводят в движение измерительный элемент,

Над вращающимся с определенной скоростью диском 1 подвешен на нити 2 другой диск 3. В отсутствие молекул движение диска 1 не влияет на положение диска 3. При наличии же молекул они будут ударяться в поверхность дисков и диск 3 будет закручиваться по

направлению вращения диска 1. Закручивание кварцевой нити фиксируется по зеркалу 4.

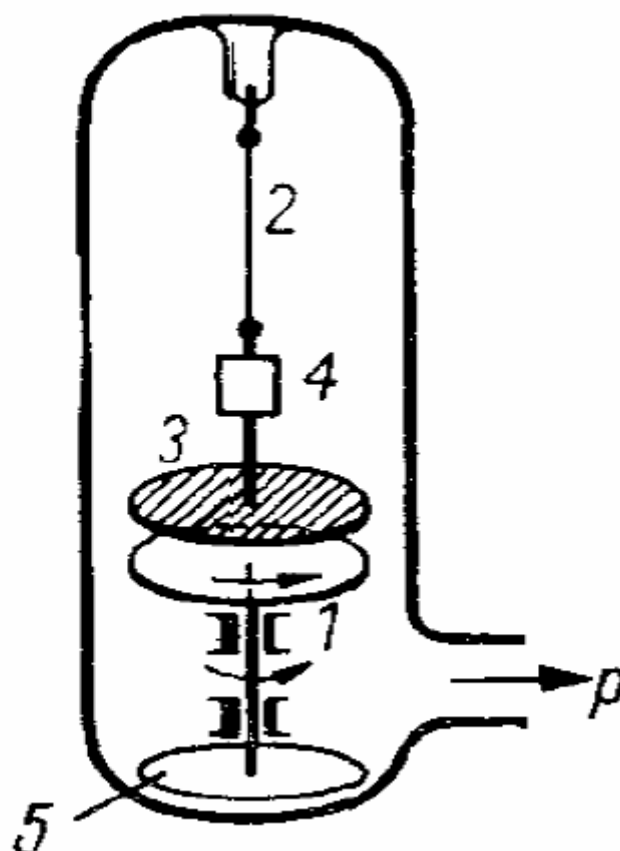


Рис. 165. Кинетомолекулярный манометр: 1 – вращающийся диск; 2 – нить; 3 – диск, подвешенный над нитью; 4 – зеркальце; 5 – диск магнитного привода [3, с. 113]

Термомолекулярные или **радиометрические** вакуумметры используют зависимость скорости молекул газа от температуры поверхностей, с которыми они взаимодействуют. Чем горячее будет поверхность, тем бóльшую скорость будут приобретать молекулы, сталкивающиеся с этой поверхностью.

Манометр Кнудсена (рис. 166) состоит из подвешенных на тонкой упругой нити рамки с подвижными пластинами А и неподвижно закреплёнными нагреваемыми пластинками В. На рамке по оси в верхней части также закреплено зеркальце, по лучику которого можно следить за закручиванием нити. На поверхность подвижных пластин со стороны нагретых неподвижных падают более «горячие» молекулы, а

с другой, открытой, стороны – обычные, имеющие более низкую скорость. Поэтому рамка будет закручиваться по часовой стрелке (см. рис. 166, вид сверху). Более подробно устройство вакуумметра Кнудсена, а также принципиальная схема измерения и градуировочная характеристика представлены на рис. 167.

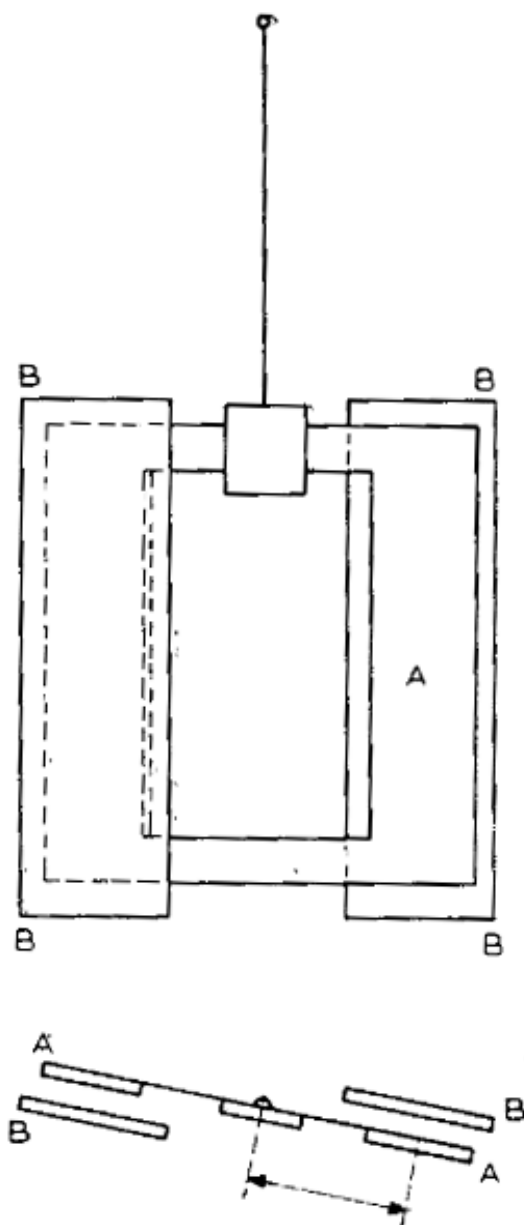


Рис. 166. Радиометрический вакуумметр Кнудсена [27, с. 191]

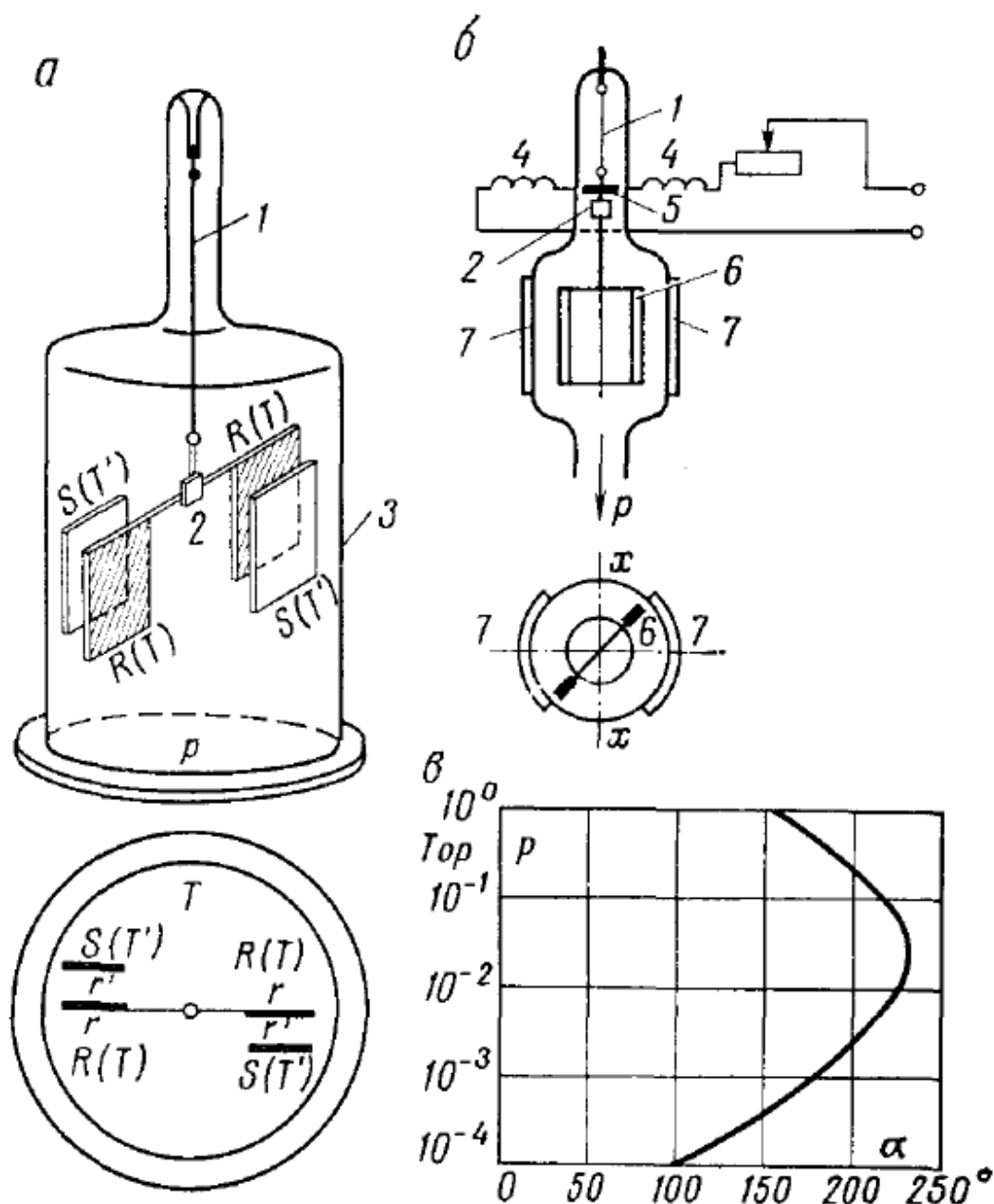


Рис. 167. Радиометрический (термомолекулярный) манометр: (а) – схема конструкции; (б) – манометр с электрической схемой измерений отклонения пластинок; (в) – градуировочная характеристика манометра: S – неподвижные пластинки (с повышенной температурой); R – подвижные пластинки (с температурой окружения); 1 – нить подвеса; 2 – зеркальце; 3 – баллон; 4 – обкладки с повышенной температурой [3, с. 115]

На рис. 168 показан радиометрический вакуумметр, способный измерять давление вплоть до 10^{-8} Па.

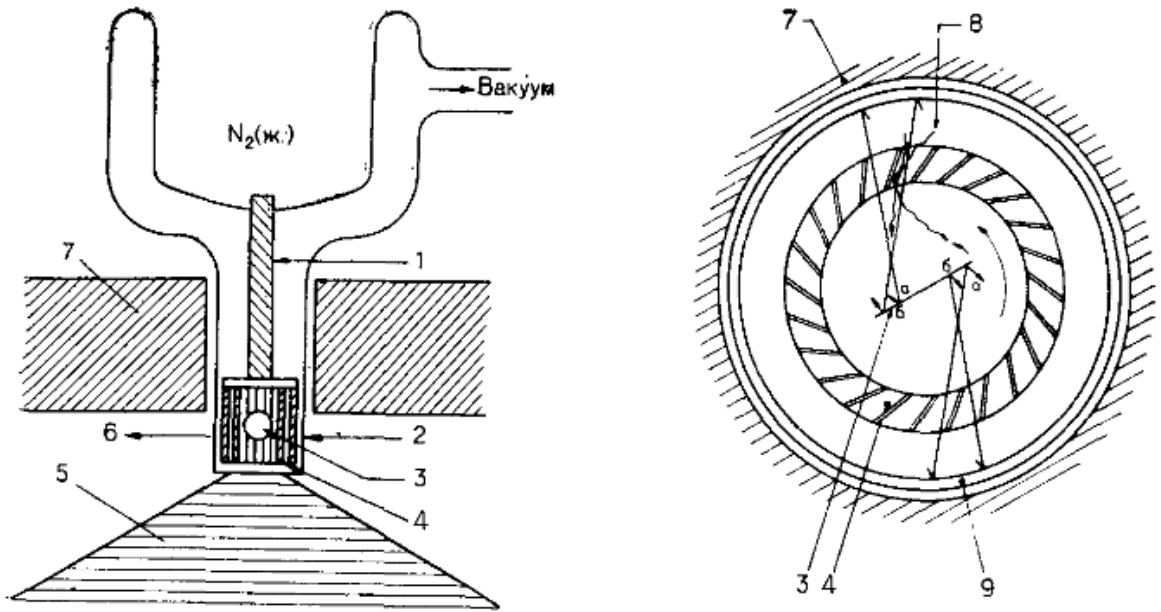


Рис. 168. Вакуумметр Эвра и Бутри (вид сбоку и горизонтальное поперечное сечение). 1 – теплопровод; 2 – луч света; 3 – графитовый диск; 4 – статор (холодный); 5 – магнит; 6 – фотоумножитель; 7 – магнит; 8 – тепловое излучение; 9 – стеклянный корпус (нагретый). [27, с. 192]

В этом вакуумметре основным элементом является вырезанный из поликристаллического магнитно-изотропного графита диск (диаметр 3 мм, толщина 0,05 мм), вращающийся вокруг своего диаметра, расположенного по вертикальной оси статора. Вращение происходит на магнитной подвеске. Статор через теплоотвод охлаждается до температуры жидкого азота, а стеклянная оболочка остаётся при комнатной температуре.

v27 Глава 5. ИЗМЕРЕНИЕ ПАРЦИАЛЬНЫХ ДАВЛЕНИЙ

v28 § 1. Введение

Во многих случаях бывает необходимым не только измерение общего давления газа или газовой смеси, но и определение наличия примесей в первом случае, или парциальных давлений газов – во втором. Состав остаточного газа, полученного после вакуумной откачки, далеко не всегда будет соответствовать составу газа исходного (например – воздуха). Это происходит потому, что средства откачки очень часто селективны к различным газам. Например, в сорбционных насосах различные газы сорбируются по-разному, эффективность откачки может зависеть от молекулярной массы того или иного газа, многие насосы очень плохо откачивают инертные газы, и т. д. В вакуумных системах состав остаточного газа будет также определяться первоначальными загрязнениями вакуумных камер, гажением (газовыделением) со стенок вакуумных конструкций, во многих случаях – газопроницаемостью камер извне, – например, по водороду.

Таким образом, измерение парциальных давлений в вакуумных системах представляет собой важную научную и технологическую задачу.

Приборы, позволяющие установить качественный состав газовой смеси и измерить парциальное давление тех или иных газов, называются **газоанализаторами**, или, по основному методу идентификации молекул, – **масс-спектрометрами**. То есть главным параметром, который анализируется при определении состава газа, является мольная масса тех или иных молекул. Иногда этот подход вызывает затруднения, например, мольная масса N_2 и CO_2 одинакова и составляет 28.

По своим техническим параметрам газоанализаторы характеризуются нижним и верхним пределами измеряемых парциальных давлений, чувствительностью, а также таким специфическим параметром, как **разрешающая способность**.

Отношение

$$M_e = \frac{M}{n_q} \quad (36)$$

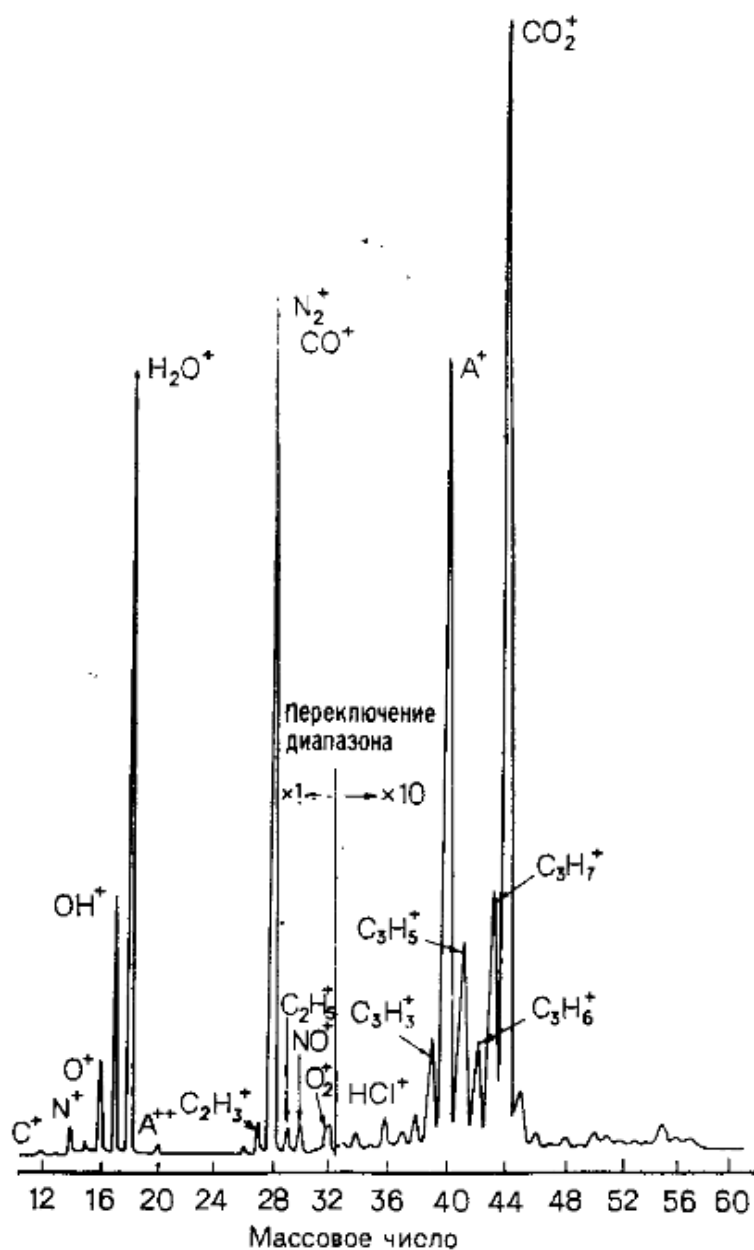


Рис. 169. Типичный масс-спектр остаточных газов, полученный с помощью 180°-ного магнитного масс-спектрометра [27, с. 202]

называется **массовым числом** иона. Здесь M – мольная масса частицы (в атомных единицах массы – а. е. м.), n_q – заряд иона. 1 а. е. м. равна 1/16 массы основного изотопа кислорода ^{16}O . Для однозарядных ионов массовое число совпадает с молекулярной массой иона.

Разрешающая способность ρ_M – это отношение массового числа M_e к наименьшему различаемому изменению массового числа ΔM_e :

$$\rho_M = \frac{M_e}{\Delta M_e}. \quad (37)$$

В зависимости от типа прибора во всем диапазоне изменения массовых чисел могут оставаться постоянными значения ρ_M , M_e/ρ_M или $M_e\rho_M$.

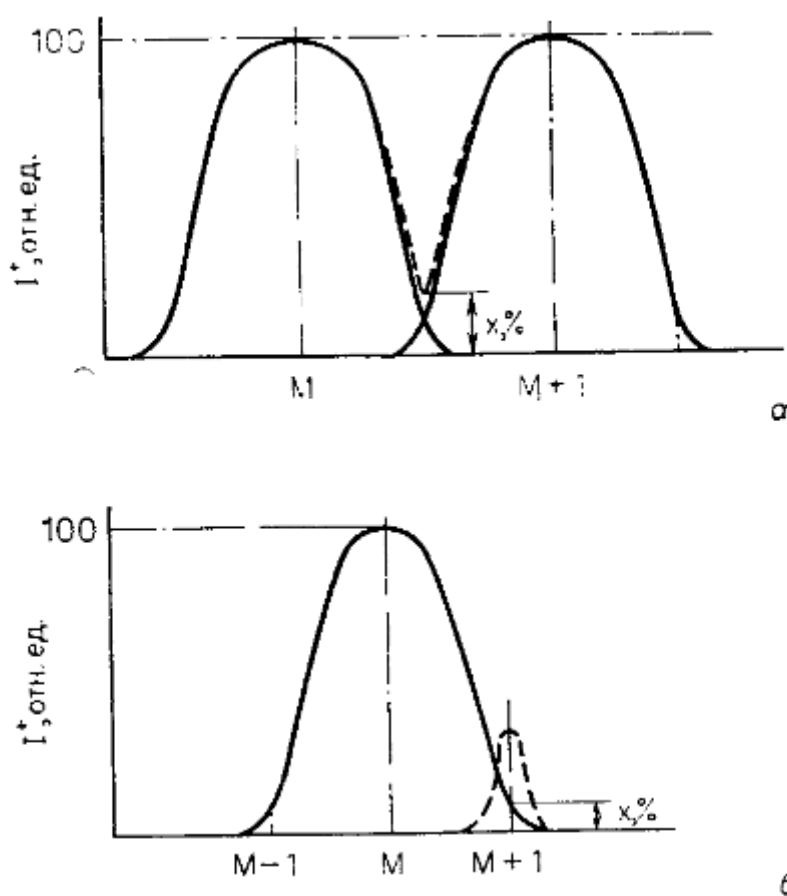


Рис. 170. Два метода определения разрешающей способности двух соседних пиков. Пояснения в тексте [27, с. 203]

В газоанализаторах (масс-спектрометрах) из специальных устройств, которые называются **источниками ионов**, экстрагируются

ионы и переносятся в анализирующее устройство, где они сепарируются (разделяются на одинаковые) и регистрируются в измерительном блоке. Происходит **сканирование** масс-спектра по всему диапазону масс. При этом выходным электрическим параметром газоанализаторов является, как правило, ток коллектора, поэтому масс-спектр строится поэтому параметру (ось ординат) и по массовому числу. Примером может служить спектр масс, приведённый на рис. 169.

Экспериментально разрешающую способность определяют по масс-спектру, Ширина пика ΔM_e измеряется на уровне 10 или 50% высоты пика.

Разрешающая способность двух соседних пиков определяется «двумя альтернативными подходами (рис. 170). Рассматриваются два перекрывающихся пика массой M и $M + 1$ одинаковой высоты и измеряется высота «седловины» между ними относительно высоты пика в % (рис. 170а). Наиболее употребимым значением является 10%. Другой подход к определению разрешающей способности связан с измерением в % вклада пика, соответствующего массе M в соседние массы $M - 1$ и $M + 1$ (рис. 170б). Разрешающая способность масс-спектрометра по обоим определениям может быть оценена путём анализа формы пика единичного иона массы M и измерения ширины пика на некоторой высоте» [27, с. 203 – 204].

В зависимости от характера используемых электрических и магнитных полей ионизационные методы измерения парциальных давлений можно классифицировать на **статические** и **динамические**. В статических методах используются постоянные, а в динамических – переменные электромагнитные поля. К ионизационным статическим газоанализаторам относятся магнитный и панорамный, а к динамическим – омегатронный, времяпролетный, квадрупольный и монополярный фильтры масс.

Разрешающая способность промышленных приборов находится в пределах 40 – 200 а. е. м.

v29 § 2. Магнитный статический газоанализатор

Статические магнитные газоанализаторы (масс-спектрометры) основаны на пространственном разделении пучка ионов одинаковой энергии в однородном поперечном магнитном поле. Газовый анализ

состоит из ускорения частиц, полученных в источнике ионов, формирования ионного пучка, разделения ионов по массовым числам и измерения интенсивности ионного тока.

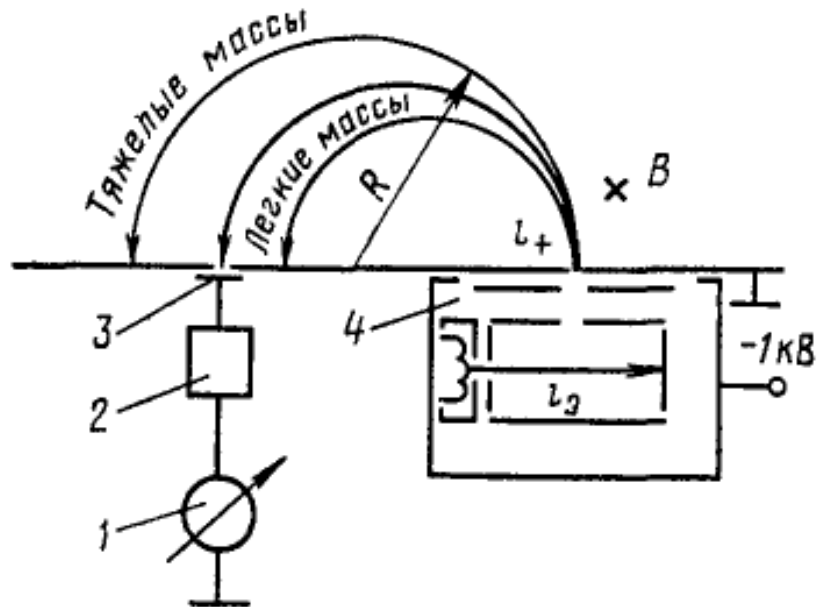


Рис. 171. Магнитный статический газоанализатор (масс-спектрометр) [11, с. 158]

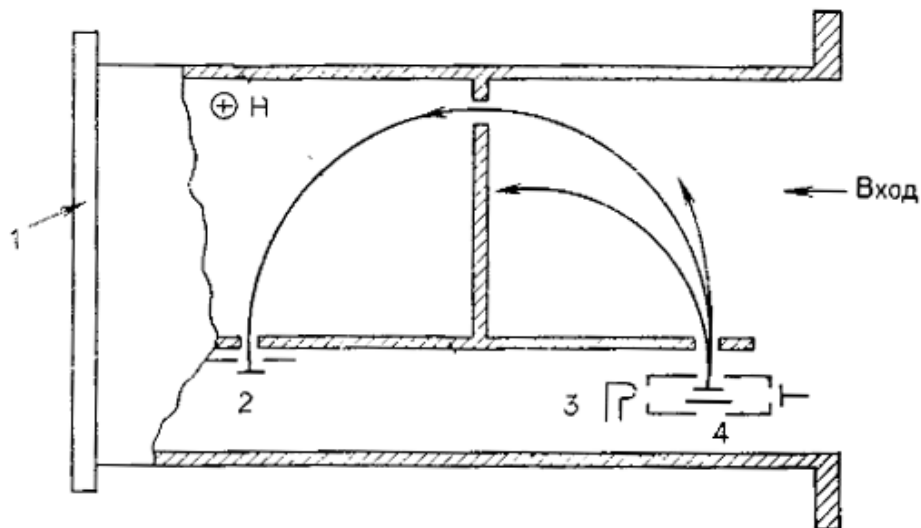


Рис. 172. Принципиальная схема 180°-ного магнитного масс-спектрометра. 1 – фланец с электрическими вводами; 2 – коллектор ионов; 3 – катод; 4 – ионный источник [27, с. 211]

«Схема действия статического 180° -ного магнитного масс-спектрометра показана на рис. 171. Ионный источник 4 находится под отрицательным потенциалом относительно земли ($\sim -1 \text{ кВ}$), который выталкивает ионный пучок i^+ в пространство дрейфа, где действует поперечное магнитное поле индукцией B под воздействием силы Лоренца. Положительные ионы движутся в направлении, определяемом правилом левой руки, по окружностям постоянных радиусов R . При этом центростремительная сила Лоренца уравнивается центробежной силой. Таким образом, перед попаданием ионов в коллектор 3, они разворачиваются на 180° (этим и объясняется название прибора)» [11, с. 158 – 159]. Более подробное устройство 180° -ного магнитного масс-спектрометра показано на рис. 172.

v30 § 3. Панорамный газоанализатор

Панорамный газоанализатор (фарвитрон) относится к статическим приборам для определения парциальных давлений. Разделение ионов по массовым числам осуществляется в нем по частоте колебаний ионов в электростатическом поле с параболическим распределением потенциала.

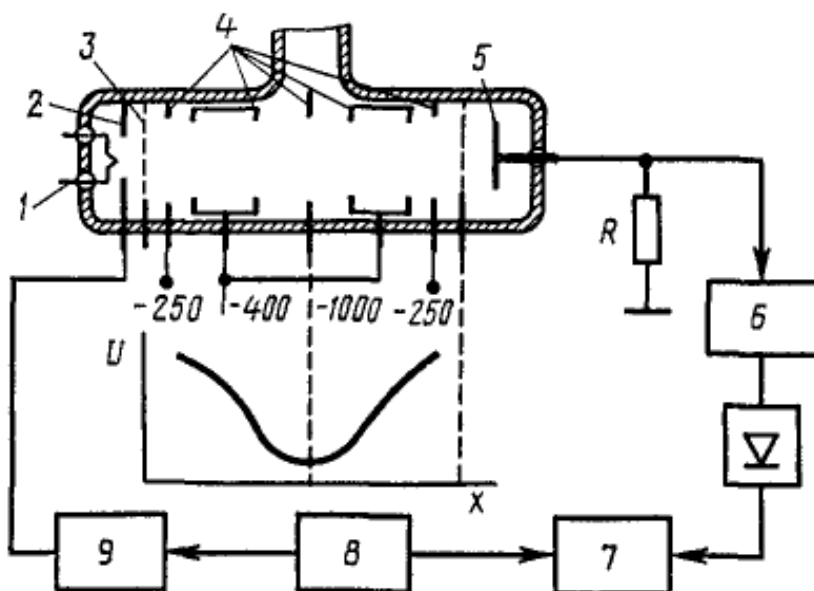


Рис. 173. Панорамный газоанализатор (фарвитрон) [11, с. 161]

«Структурная схема панорамного газоанализатора показана на рис. 173. Электронный ток между катодом 1 и сетчатым анодом 3 проходит через диафрагму-модулятор 2. Положительные ионы, образующиеся в результате электронной бомбардировки нейтральных молекул остаточных газов, ускоряются анодом в направлении электростатического поля с параболическим распределением потенциала, образованным электродами 4. Пакет ионов наводит напряжение на сигнальном электроде 5, которое усиливается высокочастотным усилителем 6 и через демодулятор поступает на вертикально отклоняющую систему катодного осциллографа 7, Горизонтальное отклонение в осциллографе осуществляется генератором развертки 8 на частоте 50 Гц , синхронизирующим горизонтальную развертку осциллографа с временной разверткой высокочастотного напряжения генератора 9, подключенного к модулирующему электроду 2. На экране электронно-лучевой трубки осциллографа можно видеть одновременно весь спектр газов» [11, с. 160 – 161].

Разрешающая способность панорамных анализаторов $\rho_M = 15 \div 20$, диапазон массовых чисел $2 \div 200$, диапазон рабочих давлений $10^{-3} \div 10^{-7} \text{ Па}$.

v31 § 4. Циклотронный газоанализатор (омегатрон)

«Циклотронный газоанализатор (омегатрон) относится к динамическим анализаторам парциальных давлений. Принцип его действия (рис. 174) основан на движении положительных ионов во взаимно перпендикулярных постоянном магнитном и высокочастотном электрических полях. Ток эмиссии термокатода 5 образует электронный луч по оси прибора z , направленный параллельно силовым линиям магнитного поля B к аноду 2, Положительные ионы, образовавшиеся в электронном луче, движутся по спирали в скрещенном постоянном магнитном поле и высокочастотном электрическом поле, приложенном к двум пластинам 1 и 3. Коллектор 4, расположенный в вырезе нижней пластины, регистрирует только те ионы, для которых период вращения совпадает с периодом изменения электрического поля. Такие ионы называются резонансными. Траектория резонансных ионов представляет собой

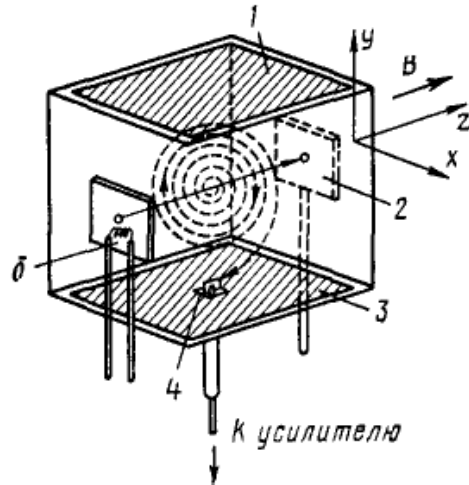


Рис. 174. Циклотронный газоанализатор (омегатрон) [11, с. 162]

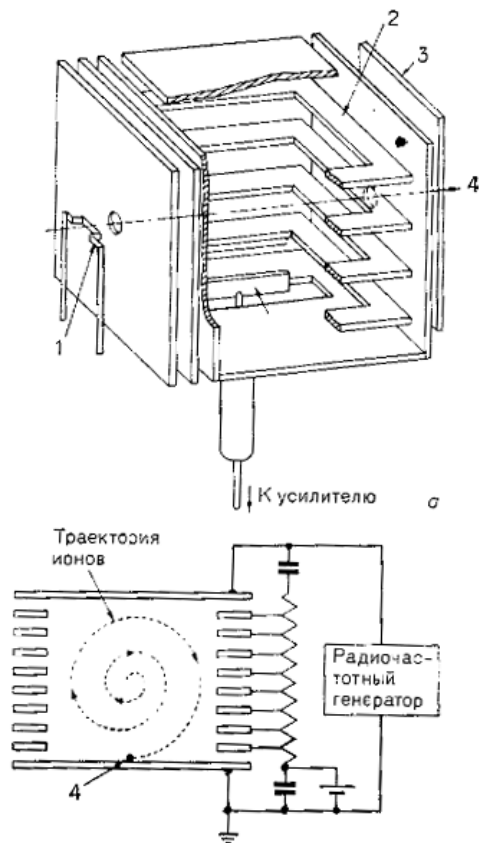


Рис. 175. Омегатрон. а) – конструктивная схема; б) – электрическая схема. 1 – катод; 2 – отражающие электроды; 3 – анод; 4 – коллектор ионов [27, с. 223]

раскручивающуюся спираль. Резонансные ионы за каждый оборот получают приращение энергии от электрического поля. Остальные ионы движутся по ограниченным траекториям и не достигают коллектора» [11, с. 161 – 162].

Более подробно устройство омегатрона показано на рис. 175. Диапазон рабочих давлений $10^{-8} \div (1 \div 4) \cdot 10^{-3} \text{ Па}$

v32 § 5. Времяпролётный газоанализатор

Времяпролётные масс-спектрометры были первыми динамическими масс-спектрометрами. Принцип их действия основан на ускорении ионов электрическим полем до приобретения ими некоторой скорости, попадании пучка ионов в дрейфовое пространство определённой длины, в котором поле отсутствует, и прохождении этого пространства до коллектора за некоторое время пролёта. Последнее будет зависеть от массы частиц.

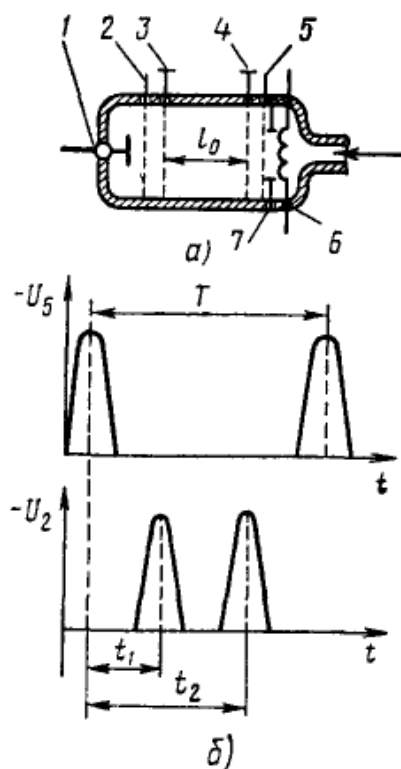


Рис. 176. Времяпролётный газоанализатор (хронотрон): а) – схема; б) – диаграмма напряжений на основных электродах [11, с. 163]

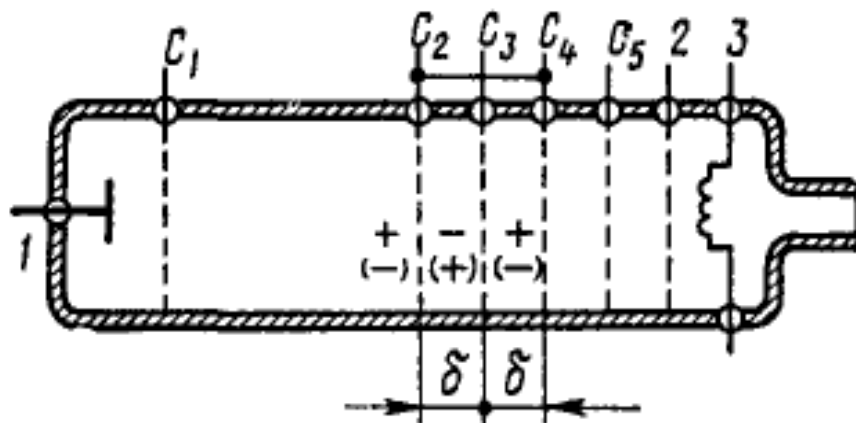


Рис.177. Радиочастотный газоанализатор (топатрон) [11, с. 164]

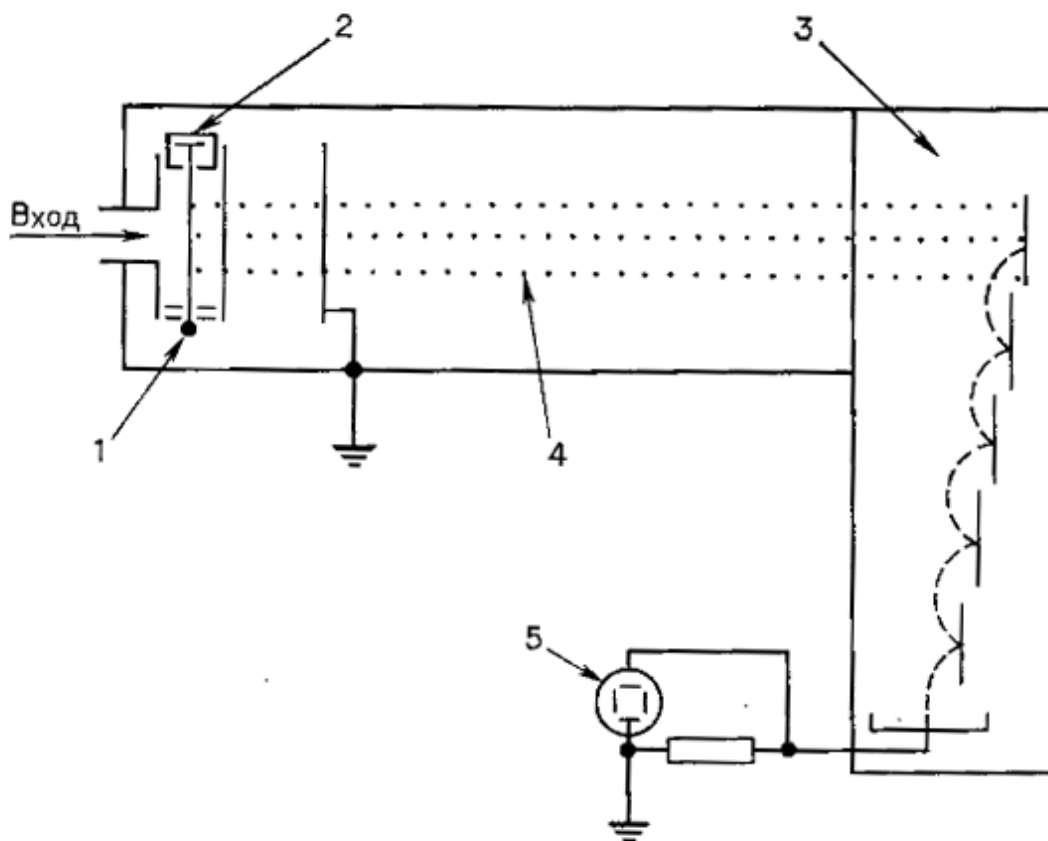


Рис. 178. Времяпролётный масс-спектрометр. 1 – катод; 2 – анодная ловушка; 3 – вторично-электронный умножитель с магнитной фокусировкой; 4 – пучок ионов; 5 – осциллограф [27, с. 221]

Одна из конструкций времяпролетного динамического газоанализатора (хронотрона) представлена на рис. 176. Ионобразование осуществляется электронным током, протекающим между термокатодом 6 и анодом 7. На сетку 5 подается отрицательный потенциал, ускоряющий ионы в пространстве дрейфа между заземленными сетками 4 и 3. Проходя сетку 5, ионы получают одинаковые приращения энергии и в соответствии со своими массовыми числами приобретают различную скорость. В промежутке между заземленными сетками 4 и 3 ионы разделяются на группы с одинаковыми массовыми числами. Пройдя пространство дрейфа, группы ионов, если сетка 2 заземлена, поочередно достигают приёмника ионов 1, которым служит вторичный электронный умножитель.

Современные хронотроны имеют разрешающую способность (на половине высоты пика) $\rho_M = 100$; диапазон массовых чисел $1 \div 600$ а. е. м.; минимальное измеряемое давление 10^{-8} Па. Недостатком хронотрона является большая длина пространства дрейфа больше 0,5 м.

На рис 177 показана другая конструкция времяпролётного газоанализатора, который называется радиочастотным масс-спектрометром или топатроном.

«Положительные ионы, образовавшиеся в области ионизации (катод 3 и анод 2), ускоряются сеткой C_5 в направлении трехсеточного каскада $C_2 - C_4$. Между сеткой C_3 и соединенными вместе сетками C_2 и C_4 подается высокочастотное напряжение. Расстояния между сетками C_2 , C_3 и C_3 , C_4 одинаковы и равны δ . Между сетками C_4 и C_3 на ионы действует сила высокочастотного электрического поля. Между сетками C_3 и C_3 действует такая же сила, но с обратным знаком. Максимальное приращение энергии получают ионы, пересекающие сетку C_3 в момент перемены знака поля. Для таких ионов время пролета трехсеточного каскада и периода высокочастотного напряжения совпадают. Такие ионы называются резонансными. Остальные ионы получают меньшее приращение энергии или замедляются. Сетка C_1 имеет отрицательный потенциал, его могут преодолеть на пути к коллектору 1 только резонансные ионы, получившие приращение

энергии. Индикация масс-спектра осуществляется осциллографом, подключенным к выходу умножителя» [11, с. 164 – 165].

Диапазон массовых чисел $2 \div 200$ а. е. м.; минимальное измеряемое давление 10^{-6} Па.

На рис. 178 представлена ещё одна конструкция времяпролётного масс-спектрометра. «Ионный пучок ускорялся импульсом 100 В. Регистрация и усиление ионного тока осуществлялись при помощи специально сконструированного электронного умножителя с магнитной фокусировкой, обладающего малым временем установления. С целью дальнейшего усовершенствования времяпролётного анализатора было предложено ввести в пространство дрейфа магнитное или электростатическое секторное поле. Такое поле позволяет улучшить фокусировку ионов по скоростям. Подсчитано, что спектрометр с радиусом траектории движения ионов 20 см может иметь разрешение, значительно превышающее 600 при условии, что разброс ионов по энергии не превышает 10 эВ» [27, с. 221].

v33 § 6. Электрический фильтр масс (квадрупольный)

«В электрическом фильтре масс разделение ионов по массам осуществляется в высокочастотном электрическом поле квадруполя, образуемого четырьмя параллельными электродами круглого сечения (рис, 179а). Противоположные электроды соединены попарно, и между ними прикладывается некоторое напряжение.

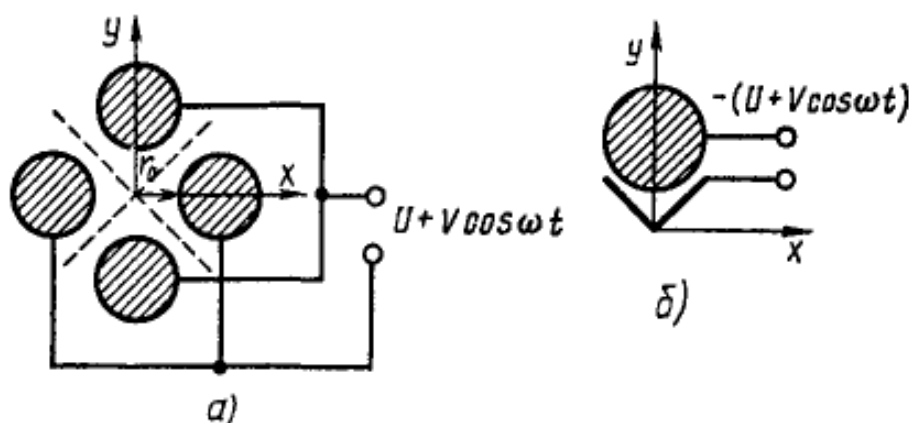


Рис. 179. Масс-фильтры: а) – квадрупольный; б) – монополярный [11, с. 165]

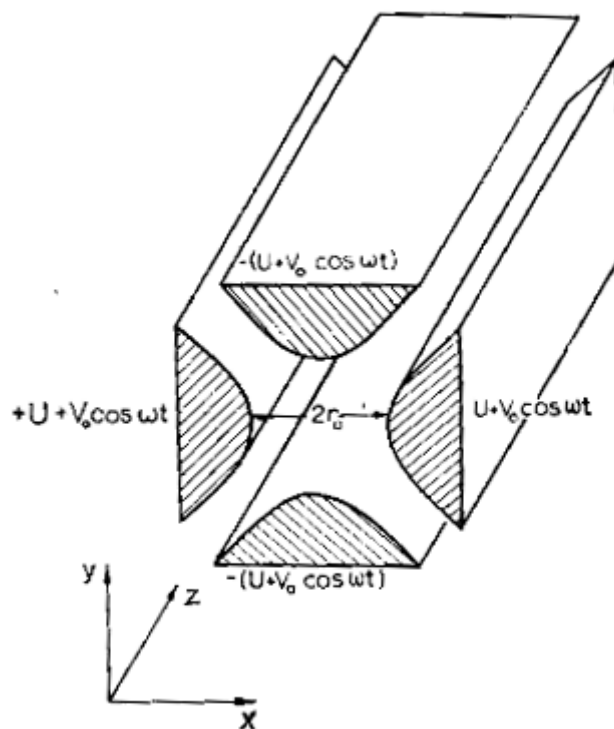


Рис. 180. Схема квадрупольного масс-спектрометра [27, с. 229]

Ионы, движущиеся по неустойчивым траекториям, неограниченно увеличивают амплитуду колебаний и нейтрализуются на электродах анализатора» [11, с. 165].

Разновидностью электрического фильтра масс является монополярный анализатор (рис. 179, б), использующий один квадрант квадрупольного поля.

Несколько другая схема квадрупольного масс-спектрометра приведена на рис. 180.

«В идеальном случае квадрупольный анализатор состоит из четырех металлических электродов в виде стержней гиперболического сечения. Ионы, ускоренные в направлении z , перемещаются в пространстве между электродами, к которым прикладываются постоянное напряжение U и переменное напряжение высокой частоты $U_0 \cos \omega t$ (см. рис.). Эти электроды, между которыми возникает двумерное квадрупольное поле, соединены попарно, а указанные напряжения приложены к двум общим выводам» [27, с. 229].

В настоящее время квадрупольный масс-спектрометр, по общему признанию, является наиболее универсальным анализатором остаточного газа, успешно конкурирующим с анализаторами магнитного типа.

Современные квадрупольные и монополярные газоанализаторы работают в диапазоне массовых чисел $1 \div 500$ а. е. м. Максимальное и минимальное рабочие давления 10^{-2} Па и 10^{-10} Па соответственно.

v34 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный в настоящем учебном пособии материал является второй частью курса, рассматривающего такое важное для химии и химической технологии понятие, как вакуум. Вакуумные установки и системы часто составляют основу многих химических производств или представляют собой важные части более общих химико-технологических процессов. Эксплуатация вакуумных систем немыслима без вакуумных измерений.

Первая часть пособия называлась «Теоретические и экспериментальные аспекты обеспечения химических и химико-технологических процессов. Вакуумная техника». В ней были рассмотрены основные положения теории вакуумной техники, понятие о степенях вакуума и достаточно подробно разобраны средства создания вакуума.

В настоящем учебном пособии рассмотрены теоретические аспекты вакуумметрии и разобрано устройство и принцип работы вакуумметров прямого действия (жидкостных, деформационных), косвенных измерений (теплоэлектрических, ионизационных и магнитных) и средств измерения парциальных давлений и газовых потоков в вакууме, а также освещены некоторые вопросы технического устройства вакуумных систем.

Пособие закладывает у будущих специалистов базовые основы для успешного решения прикладных задач в области химии и химической технологии. Учебное пособие предназначено для оказания помощи обучающимся в более продуктивном овладении знаниями и навыками для практической работы на производстве и в научных учреждениях.

v35 ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Зависят ли показания жидкостного U-образного манометра от разного диаметра левого и правого колен?
2. Что такое торричеллева пустота?
3. В каком случае можно измерять давление U-образного манометра по изменению уровня одного колена?
4. Как определить, к какому классу приборов относится деформационный манометр Бурдона: к вакуумметрам или манометрам?
5. Понятие степеней вакуума; какой критерий при этом используется?
6. В чем состоит разница между абсолютными и косвенными методами измерения низких давлений?
7. Определение понятия сверхвысокого вакуума.
8. К какому классу вакуумметров относится баратрон: тепловой, ионизационный, мембранно-ёмкостной, магниторазрядный?
9. В чем состоит влияние рода газа на работу тепловых манометров?
10. Для чего используются вакуумные ловушки при измерении вакуума компрессионными манометрами?
11. От чего зависит нижний предел измерения тепловых преобразователей?
12. У каких преобразователей меньше инерционность: у термопарных или Пирани?
13. Какие способы передачи тепла эффективны при высоком вакууме?
14. У каких тепловых вакуумметров диапазон сдвинут в сторону более высокого вакуума?
15. От чего зависит величина средней длины свободного пробега молекул газа?
16. Что может дать более высокую точность в тепловых датчиках – режим постоянного тока накала или режим постоянной температуры (при прочих равных условиях)?
17. Для каких вакуумметров показания не зависят от рода газа: тепловых, ионизационных, компрессионных?
18. Можно ли конвекционным вакуумметром измерять давление $10^{-4} \div 10^{-5}$ Торр?

19. Почему длина свободного пути электрона при одинаковой температуре и давлении больше, чем молекул газа?
20. Какие ионизационные вакуумметры измеряют более глубокий вакуум – с внешним коллектором или с осевым?
21. Что такое эффективность ионизации молекул газа?
22. Каковы основные закономерности термоэлектронной эмиссии?
23. В чем причины возникновения фоновых токов в ионизационных преобразователях?
24. Почему чувствительность ионизационных преобразователей зависит от рода газа?
25. Зависит ли принцип работы тех или иных классов вакуумметров от степени вакуума, как физической величины?
26. Работа каких вакуумметров и насосов основана на одних и тех же физических принципах?
27. Почему чувствительность ионизационных преобразователей зависит от рода газа?
28. Какие датчики вакуума обладают откачивающим действием?

(При составлении некоторых вопросов использован источник [12]).

Использованная литература

1. Кузьмин В.В. Вакуумные измерения. М.: Издательство стандартов. 1992. 228 с.
2. Основы вакуумной техники / Б.И. Королёв, В.И. Кузнецов, А.И. Пипко, В.Я. Плисковский. М: Энергия. 1975. 416 с.
3. Архипов А.В., Мишин М.В., Филимонов А.В., Андронов А.Н. Методы получения вакуума и криогенных температур. Санкт-Петербург. Издательство политехнического университета. 2013. 216 с.
4. Королёв Б.И. Основы вакуумной техники. М., Л.: Госэнергоиздат. 1957. 399 с.
5. Лобко В.Н. Определение концентрационной зависимости коэффициента диффузии водорода в металлах в условиях нестационарного проникновения. Дисс. на соискание уч. степени к.х.н. Владимир. 2000. 204 с.
6. Лобко В.Н. Теоретические и экспериментальные аспекты обеспечения химических и химико-технологических процессов. Температура. Термометры и измерительные схемы. Учебное пособие (электронное издание) / Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых; Владимир: Изд-во ВлГУ, 2022. 232 с.
7. Вакуумная техника. Справочник. 2-е изд. перераб. и доп. – Под общ. ред. Е.С. Фролова, В.Е. Минайчева. М. Машиностроение. 1992. 472 с.
8. Основы вакуумной техники / А.И. Пипко, В.Я. Плисковский, Б.И. Королёв, В.И. Кузнецов. 2-е изд., перераб. и доп. М: Энергоиздат. 1981. 432 с.
9. Вакуумная техника. Справочник. 3-е изд. перераб. и доп. – Под общ. ред. К.Е. Демихова, Ю.В. Панфилова. М. Машиностроение. 2009. 590 с.
10. Ничипорович Г.А. Вакуумметры. М.: Машиностроение. 1977. 65 с.
11. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. Изд. 2-е, перераб. и доп. М. ВШ. 1990. 320 с.
12. Розанов Л.Н. Вакуумная техника. Изд. 3-е, перераб. и доп. М. ВШ. 2007. 401 с.

13. Долгирев Ю.Е. Метрология и техника физического эксперимента. Электронное текстовое издание. Екатеринбург. 2014. 308 с.
14. Гершаник А.П. и др. Сильфонные вакуумметры повышенной жёсткости. ЖТФ. 1975. Т. XIX. №1. С. 256.
15. Рамзаева Е.А. и др. Абсолютный электронно-механический манометр для давлений $1,0 \div 1 \cdot 10^3$ Па. Научные приборы. 1973. Т. 15. №1. С. 49.
16. Основы вакуумной технологии. / Под общей ред. Walter Umrath. ООО «ХайВак». Leybold GmbH. 1998. 216 с.
17. Чёрненькая Л.В. и др. Мембранный вакуумметр с частотным выходом. Приборы и системы управления. 1984. №1. С. 27.
18. Голоскоков В.В., Творогов И.В. Приборы и аппаратура вакуумметрии и течеискания. Физ. и техн. высок. и сверхвысок. вакуума: тез. докл. V Всесоюз. конф. Ч. I. Л.: 1985. С. 3.
19. Прасолов Р.С. Теплообмен свободной конвекцией цилиндра в разреженном газе. Теплофиз. высоких темпер. 1968. Т. 6. Вып. 3. С. 555.
20. Гицу Д.В. и др. Некоторые термоэлектрические и термомагнитные свойства сплавов Bi–Sn–Te. ФТП. 1968. Т. 2. Вып. 2. С. 260.
21. Беккерман Ф.И. и др. Некоторые особенности вакуумных измерений термоэлектрическими преобразователями на основе полуметаллов типа Bi. Физ. и техн. высок. и сверхвысок. вакуума: тез. докл. V Всесоюз. конф. Ч. II. Л.: 1985. С. 162.
22. Шешин Е.П. Основы вакуумной техники. ФФКЭ / МФТИ. 2001. 122 с.
23. Прасолов Р.С. Расчёт градуировочных кривых манометров типа Пирани. Измерительная техника. 1970. №10. С. 88.
24. Аверьянов П.Н., Воронов И.Д., Зайкин В.М., Пашков В.В., Рамзаева Н.А., Шевченко Е.В. Экспериментальное исследование погрешностей измерения преобразователей давления разреженного газа. // Приборы и техника эксперимента. 1980. № 2. С. 155-157.
25. Электрические измерения. Средства и методы измерений (общий курс). / Под ред. Е.Г. Шрамкова. М.: Высшая школа. 1972.
26. Электрические измерения. Общий курс. / Под ред. А.В. Фремке. Л.: Энергия. 1973.
27. Уэстон Дж. Техника сверхвысокого вакуума. М.: Мир, 1988. 368 с.

28. Кузьмин В.В., Левина Л.Е., Творогов И.В. Вакуумметрическая аппаратура техники высокого вакуума и течеискания. М.: Энергоатомиздат. 1984. 240 с.

29. Пенчко Е.А. Воздухостойкий ионизационный манометр. // Приборы и техника эксперимента. 1961. №1. С. 170.

30. Биршерт А.А., Кузьмин В.В., Таубес М.Р. Новый ионизационный вакуумметрический преобразователь ПМИ-51. // Метрологическая служба в СССР. 1984. №7. С. 14.

31. Kobayshi S. High sensitive Hot Catode Ionization Gauge. Proc. of the First Internat. Congress on Vac. Techn., June 1958. Namur. Belgium. 1960. Vol. 1. P. 271.

32. Патент ПНР №53042. Prozniomerz jonizacyjny dla najnizszych cisnieni / Groszkowsky J.

33. Redhead P.A. Rev. Sci. Instrum. 1960/ V. 31. P. 343.

Дополнительная литература

1. Левин Г. Основы вакуумной техники. М.: Энергия. 1969. 272 с.

2. Вакуумная техника: учеб. пособие / А. А. Лебедев [и др.]. – СПб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. 2020. 63 с.

3. Галеев И.Г., Ханнанов Р.Б. Теоретические основы вакуумной техники. Учебное пособие. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2015. 64 с.

4. Беркин А.Б., Василевский А.И. Физические основы вакуумной техники. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2014. 84 с.

5. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники / Под ред. М. И. Меньшикова. М.: Мир, 1964. 715 с.

6. Даннлин Б. С. Мннайчев В. Е. Основы конструирования вакуумных систем. М.: Энергия. 1971. 392 с.

7. Хоффман Д., Сингх Б., Томас Дж. Справочник по вакуумной технике и технологиям. М.: Техносфера. 2011. 736 с.

8. Кузьмин В. В. Состояние и тенденции развития современного вакуумметрического приборостроения // Вакуумная техника и технология. 2001. Т. 11. № 1. С. 3.

9. Кузьмин В. В. Современное состояние разработки и производства вакуумметрических приборов // Вакуумная техника и технология. 2002. Т. 12. № 4. С. 193.

Учебное электронное издание

ЛОБКО Владимир Николаевич

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ
ХИМИЧЕСКИХ И ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Средства измерения вакуума

Учебное пособие

*На первой полосе обложки размещено фото
деформационного стрелочного вакуумметра*
(источник URL: https://www.youtube.com/watch?v=hFO_7eA_5co)

Издается в авторской редакции

Системные требования: Intel от 1,3 ГГц; Windows XP/7/8/10; Adobe Reader;
дисковод CD-ROM.

Тираж 25 экз.

Владимирский государственный университет
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых
Изд-во ВлГУ
rio.vlgu@yandex.ru

Институт биологии и экологии
кафедра химии
lobko_vn@vlsu.ru