

СУЧАСНІ МЕТОДИ ВИМІРУ НИЗЬКИХ І НАДНИЗЬКИХ ТИСКІВ У ГАЗОВОМУ СЕРЕДОВИЩІ

канд. фіз.-мат. наук, старший викладач Пилипенко О.В.

- Завдання вимірювання тиску у вакуумних системах є не менш важливою, ніж отримання вакууму. Практично всі вакуумні системи ми, від низьковакуумних до надвисоковакуумних, містять датчики для реєстрації тиску. Однак через те, що діапазон тисків, застосовуваних у науці та техніці, надзвичайно широкий (від атмосферного тиску до менш ніж 10^{-12} Торр), на даний момент не існує методики та фізичних принципів, які дозволили б створити ідеальний універсальний датчик тиску «на всі випадки життя».
- У зв'язку з цим, при виборі способу та апаратури для вимірювання низьких тисків необхідно брати до уваги цілий ряд моментів, які можуть бути істотними в конкретному додатку. Наприклад, температурна та часова стабільність, відтворюваність показань, залежність показань від складу газу тощо.

вакуумні технології, де вони не використовуються?

Доїльні апарати:	360–400 Торр
Вакуумне пакування	1–3 Торр
Вакуумне сушіння:	~1 Торр
Вакуумне напилення:	10^{-1} - 10^{-5} Торр
Вакуумна плавка:	10^{-3} - 10^{-6} Торр
Джерела синхротронного випромінювання:	10^{-9} - 10^{-10} Торр
Адронний колайдер:	10^{-11} - 10^{-12} Торр
Космічний простір	до 10^{-16}

Параметрів вакуумметрів:

- Діапазон вимірювань,
- принцип вимірювання тиску, закладений у вакуумметрі,
- точність вимірів,
- відтворюваність показань,
- наявність ефекту гістерезису,
- Роздільна здатність,
- стабільність показань (у часі та залежно від температури),
- залежність показань від типу газу,
- можливість вимірювання тиску хімічно активних газів,
- наявність відкачувального ефекту,
- вимоги до матеріалів вакуумного датчика, що контактують з вакуумом,
- наявність аналогового та (або) цифрового (RS232, RS485, USB) виходу,
- рівень максимально допустимого тиску,
- міцність конструкції та вузлів вакуумного датчика,
- чутливість до магнітних та електромагнітних полів,
- тип фланця, що приєднується (CF, NW, tube),
- надійність вакуумметра,
- наявність сертифіката про внесення вакуумметра до Реєстру засобів вимірювань,
- необхідність та складність калібрування вакуумметра,
- вартість вакуумметра.

Принцип роботи приладу безпосередньо пов'язаний з тим, який параметр об'єкта (в даному випадку газу) безпосередньо вимірюється датчиком.

За цим критерієм всі вакуумметри можна розділити на 4 групи:

- Прилади, що вимірюють гідростатичний тиск газу. До них відносяться: рідинні манометри; деформаційні манометри та вакуумметри;
- Прилади, що базуються на залежності теплопровідності газів від тиску: вакуумметр Пірані; термопарний вакуумметр;
- Прилади, що базуються на залежності в'язкості газів від тиску: ротаційний вакуумметр;
- Прилади, що ґрунтуються на залежності іонізації в газі від тиску: термодіємні вакуумметри; вакуумметри із холодним катодом; екстракторні вакуумметри.

Рідинні (гідростатичні) вакуумметри

Рідинні (гідростатичні) вакуумметри - одні з перших приладів. рів для вимірювання тиску розріджених газів. Вони мають дуже просту та надійну конструкцію, представлену на рис. 1. U-подібна трубка частково заповнюється рідиною з низьким тиском насичених парів та одним з кінців з'єднується з вакуумною системою. Другий кінець приладу може залишатися відкритим на атмосферу або бути запаяним.

Величина тиску в системі визначається на основі законів гідростатики:

а) $p = p_{\text{атм}} - \rho gh$ - для конструкції з відкритим коліном

б) $p = p_{\text{нп}} + \rho gh$ - для конструкції із запаяним коліном, де $p_{\text{атм}}$ - атмосферний тиск, $p_{\text{нп}}$ - тиск насиченої пари рідини у запаяному коліні.

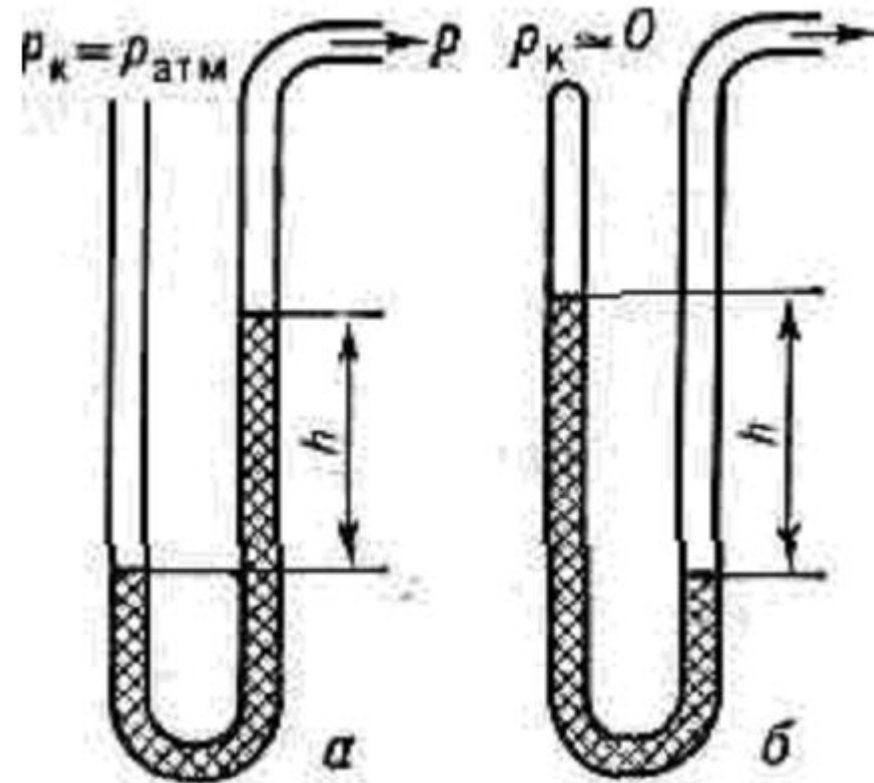


Рис. 1. Пристрій рідинного (гідростатичного) U-подібного вакуумметра: а – із відкритим коліном, б – із закритим коліном

Рідинні (гідростатичні) вакуумметри

- Діапазон тисків, вимірних рідинними вакуумметрами, визначається їх конструкцією та застосовуваною рідиною. Використовуючи спеціальні вакуумні олії з низькою щільністю і тиском насиченої пари, можливо вимірювати тиск у діапазоні 1000–1 Торр. Із застосуванням спеціальної оптики цей діапазон може бути розширений до 10^{-3} Торр.
- До переваг цього типу вакуумметрів можна віднести їх простоту, надійність, незалежність показань від складу газу. Їх можна використати для градуювання та перевірки інших вакуумметрів.
- Недоліками гідростатичних вакуумметрів є їх громіздкість, малий динамічний діапазон, складність перетворення показань у електричний сигнал. Крім цього, застосовувані олії можуть розчиняти гази, а застосування ртуті утруднено через її токсичність.

Компресійні вакуумметри

Вакуумметр Мак-Леода, схематично зображення якого представлено на рис. 2. Він складається з балона з відомим об'ємом V , двох капілярів однакових діаметрів, трубки, що з'єднує вакуумметр з вакуумною системою, і резервуара з ртуттю з напускним клапаном. Перед вимірюванням тиску рівень ртуті повинен лежати нижче за рівень А (рис. 2).

Тиск у балоні дорівнює тиску у вакуумній системі p . Процедура вимірювання тиску зводиться до напуску ртуті з резервуару за допомогою клапана до моменту досягнення рівня ртуті в правому капілярі положення (Рівня кінця запаяного капіляра). При цьому обсяг газу V , відтятий у точці А від вакуумної системи, стискається (компресується) до об'єму $h \cdot S$, де h - висота стовпа газу в закритому капілярі, S - площа перерізу капіляра. В силу закону Бойля-Маріотта для ізотермічного стиску:

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

де ρ – густина ртуті, g – прискорення вільного падіння. Оскільки $p \ll \rho gh$, ця рівність може бути переписано у вигляді

$$pV = \rho gSh^2$$

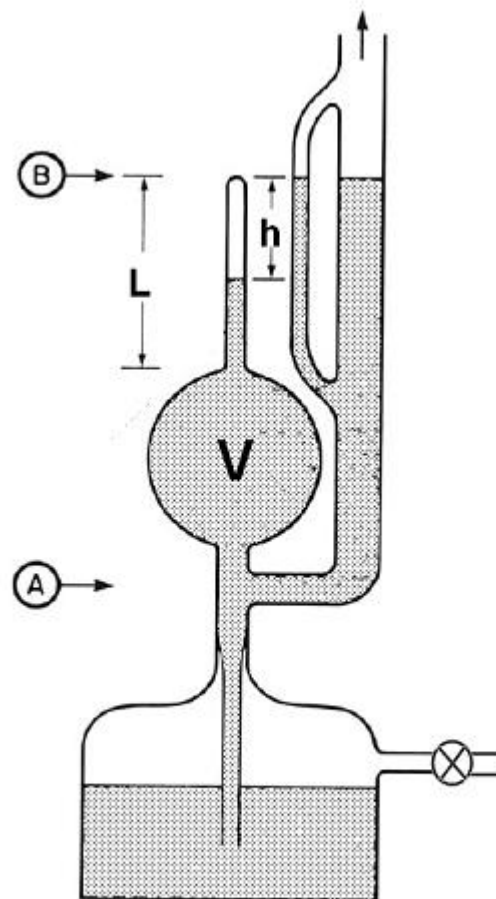


Рис. 2 Вакуумметр Мак-Леода

Вакуумметри Мозера та Vacustat

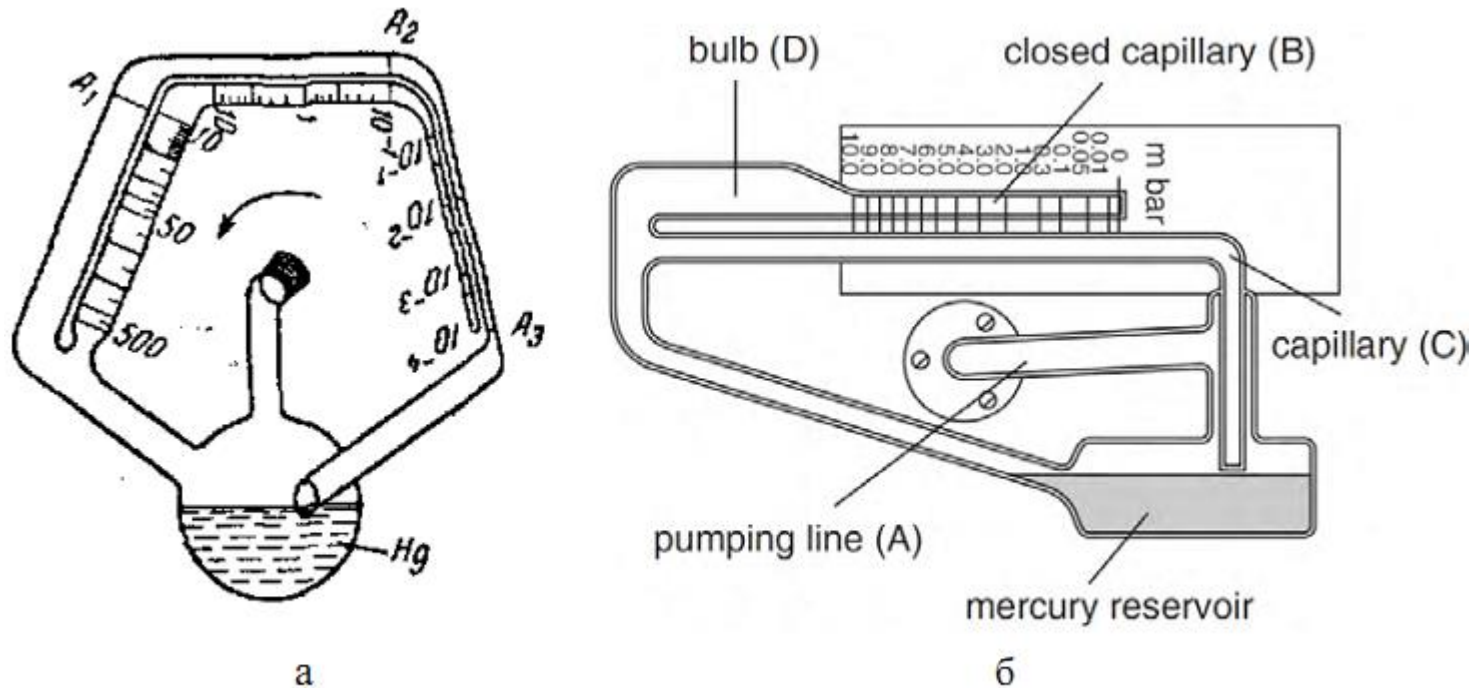


Рис. 3. Вакуумметр Мозера (а) и Vacustat (б)

Вони з'єднуються з вакуумною установкою за допомогою шліфу, навколо якого прилад може повертатися. Перед початком вимірювань прилад розташовують таким чином, щоб резервуар з ртуттю опинився в нижньому положенні. Вимірювання проводять повертаючи прилад на шліфі проти годинникової стрілки, поки вимірювальний капіляр не опиниться у вертикальному положенні. При цьому тиск визначається за рівнем ртуті в капілярі за допомогою шкали, проградуєваної в одиницях тиску.

Нижня межа тиску, доступний для вимірювання вакуумметром Мозера становить 10^{-4} мбар, а Vacustat – 10^{-2} мбар.

деформаційні вакуумметри

Серед механічних манометрів широкого поширення набули прилади на основі трубки Бурдона – трубки овального перерізу, запаяної з одного кінця і зігнутою у вигляді дуги кола або спіралі. Відкритий кінець трубки з'єднується з об'ємом, в якому проводиться вимірювання тиску. Під дією зовнішнього та внутрішнього тиску, а також сил пружних деформацій у самій трубці, вона змінює свою форму, злегка розпрямляючись при збільшенні тиску в трубці. Переміщення запаяного кінця трубки передається на стрілку, розташовану навпроти шкали (див. рис. 4)

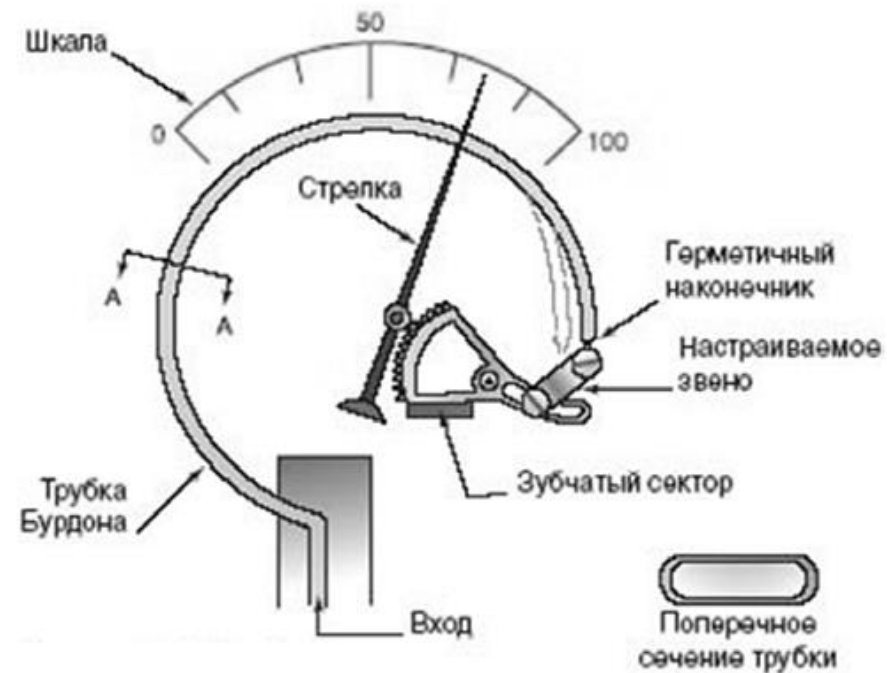


Рис. 4. Манометр на основі трубки Бурдона

деформаційні вакуумметри

Для вимірювання низьких тисків застосовуються капсульні (рис. 5, а) та діафрагмові (рис. 5, б) деформаційні манометри. До переваг механічних деформаційних манометрів можна віднести також їх порівняння. низьку вартість, відсутність рідини та критичних скляних деталей, високу надійність приладу. З їх допомогою можна проводити вимірювання тиску в діапазоні від одиниць мілібарів до атмосферного тиску.

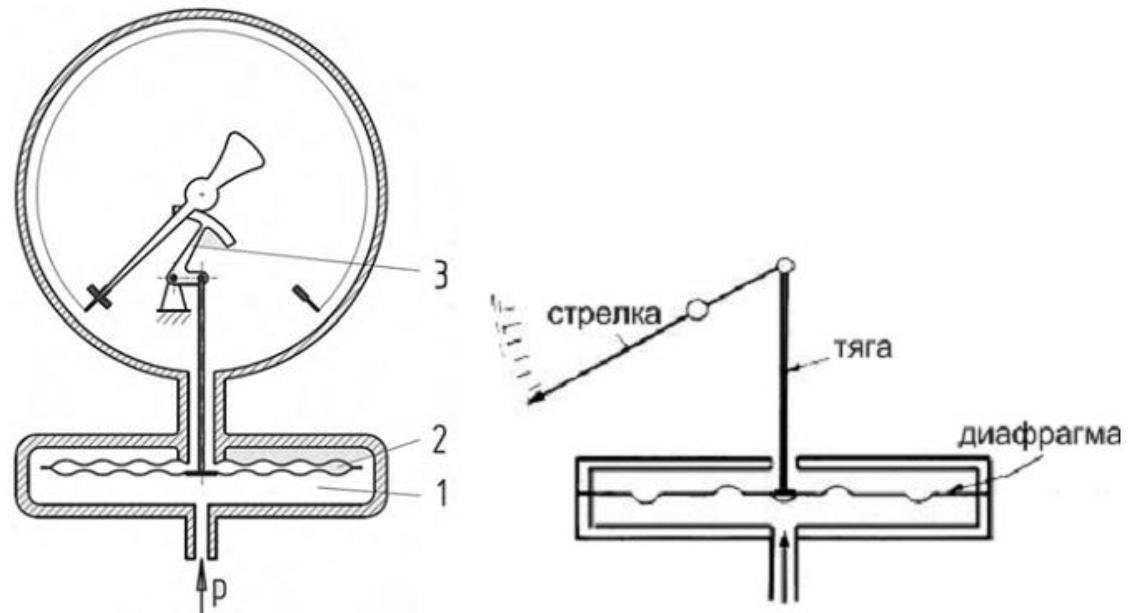


Рис. 5. Пристрій капсульного (а) та мембранного (б) манометра:
1 – вимірювальна камера, 2 – капсульний елемент,
3 – механізм передачі руху на стрілку

деформаційні вакуумметри

Серед деформаційних вакуумметрів з електронною системою реєстрації тиску найбільш широкого поширення набули ємнісні датчики, в яких переміщення чутливої мембрани реєструється по зміни електричної ємності між нерухомим електродом і мембраною (див. рис. 6). Даний тип вакуумних датчиків має високу точність та чутливість, а також високою швидкістю вимірювань.

На жаль, ємнісні датчики, як правило, мають значну температуру. ним дрейфом, тому моделі, призначені для прецизійних вимірювань. ній, забезпечуються пристроєм температурної стабілізації, що призводить до збільшення без того дуже високої вартості приладу. Як правило, діапазон вимірів датчика становить 4 декади вимірюваного тиску. Тобто, якщо верхня межа становить 10 Тор, то нижня межа чутливості дорівнює 1 мТор. На даний момент нижня межа вимірювань ємнісних датчиків становить 10^{-6} Тор.

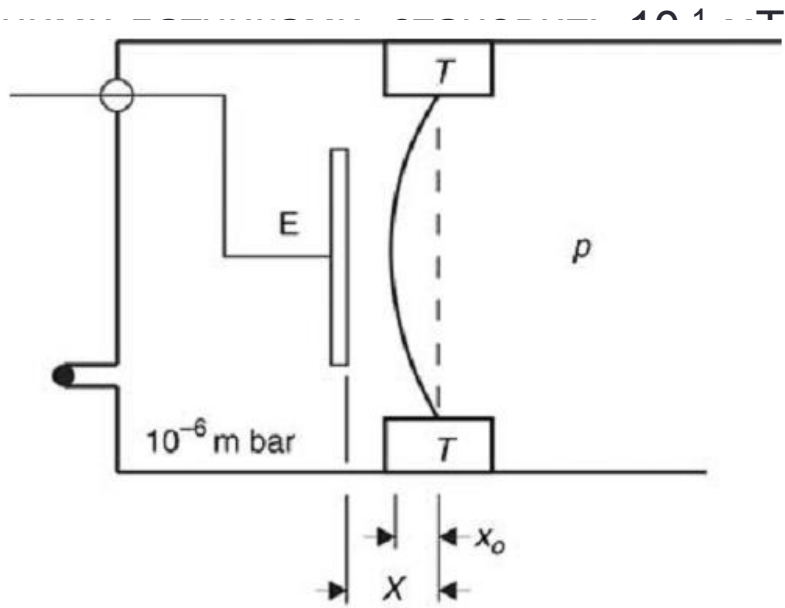


Рис. 6. Принцип роботи ємнісного деформаційного датчика

Датчики теплопровідності газу (термопарний вакуумметр)

Датчики тиску, засновані на залежності теплових втрат нагрітих тіл залежно від тиску газу, в даний час є, напевно, найпоширенішими для визначення тиску від атмосферного та до 10^{-3} Тор. Причина їх популярності криється в простоті виготовлення та експлуатації, високої надійності та швидкої реакції

В колбу поміщено дріт, що нагрівається струмом який протікає до температури 320°C . Зміна тепловідведення від дроту, пов'язана зі зміною тиску, призводить до зміни температури термопари, з якої знімаються показання. Діапазон вимірюваних тисків становить 10^{-3} -100 Тор, а з урахуванням конвективних втрат тепла – до 760 Тор.

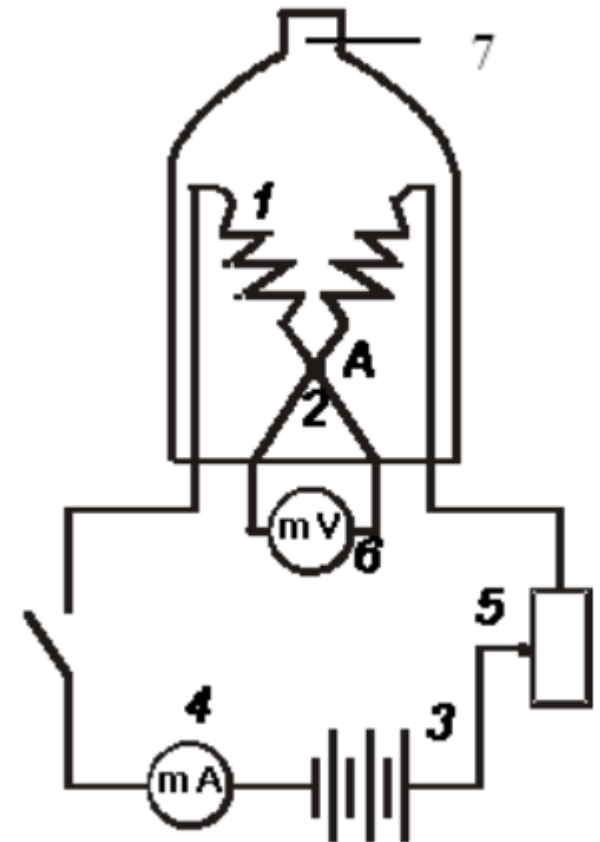


Рис. 7. Пристрій термопарної лампи та схема її включення:

- 1 – нитка нагріву; 2 – термопара; 3 – джерело живлення;
- 4 – вимірювач струму розжарення; 5 – регулятор струму розжарення;
- 6 – вимірювач термо-ЕРС; 7 – з'єднувальний патрубков

Іонізаційні вакуумметри

В даний час використовуються іонізаційні вакуумметри двох основних видів. У приладах із гарячим катодом електрони, емітовані з нагрітої поверхні та прискорені електричним полем, іонізують молекули газу. Під дією електричного поля іони збираються на колекторі, викликаючи появу іонного струму. Величина іонного струму в певному інтервалі тисків лінійно залежить від концентрації молекул і може слугувати для визначення тиску.

У датчиках з холодним катодом іонний струм створюється за рахунок процесів в самостійному газовому розряді, що утворюється під дією електричного та магнітного полів. І так само, як у датчиках з гарячим катодом, величина струму в розряді слугує для визначення тиску у вакуумній системі.

Датчики цього типу являють собою триелектродну лампу, ввімкнену за схемою, представленою на рис. 8. Електрони, що емітуються розкаленим катодом, прискорюються під дією позитивного потенціалу сітки і, пролітаючи крізь неї, потрапляють у простір між сіткою і колектором. Внаслідок електронного удару нейтральні молекули іонізуються. і захоплюються негативним потенціалом до колектора (аноду), струм на якому служить для визначення тиску газу.

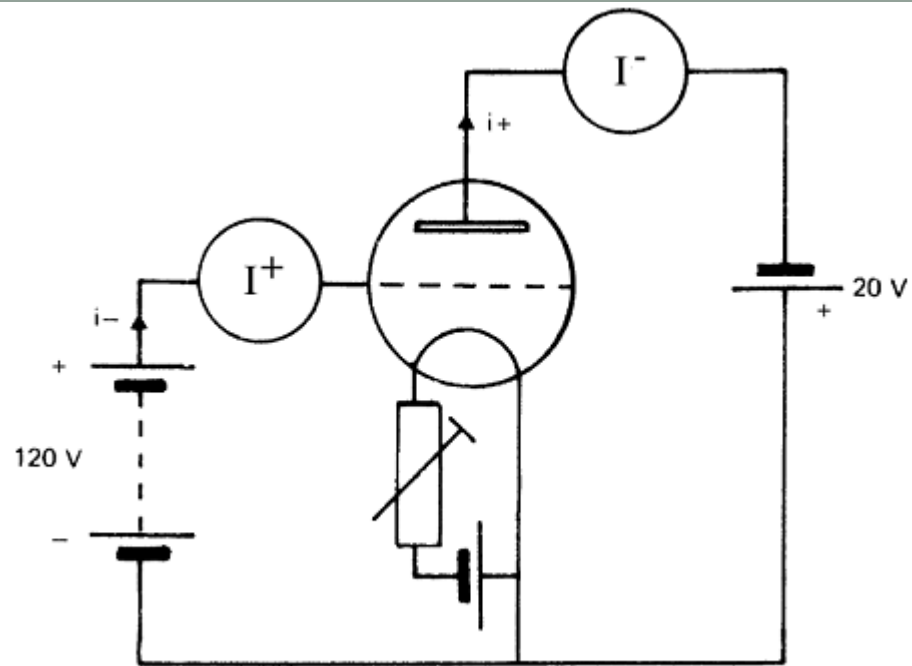
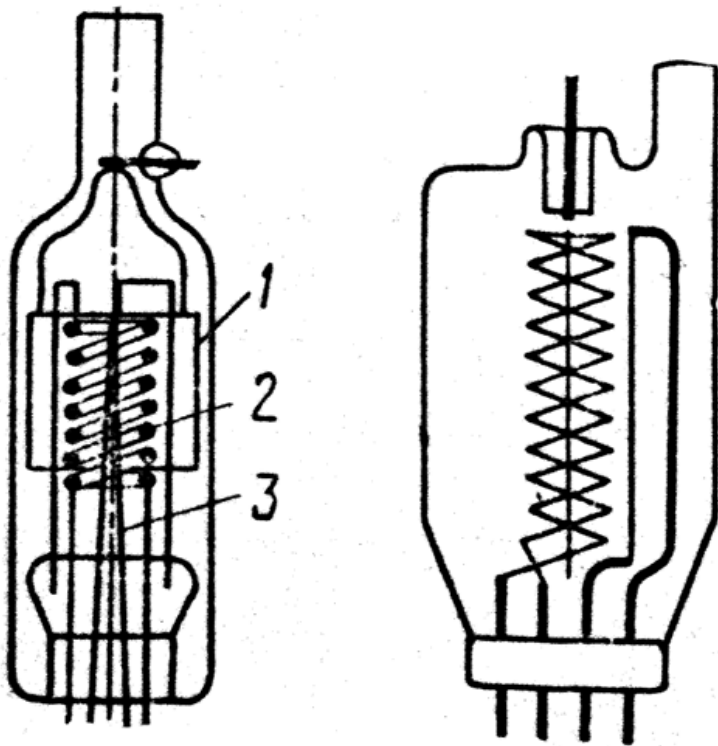


Рис. 8. Схема включення іонізаційного датчика з гарячим катодом

Конструктивні схеми електронних іонізаційних перетворювачів:

- а) із зовнішнім колектором (ПМІ-2; ПМІ-3-2);
- б) з внутрішнім колектором (ІМ-12; ПМІ-12-8);

1 - колектор, 2 - сітка-анод, 3 - прямонакальний катод

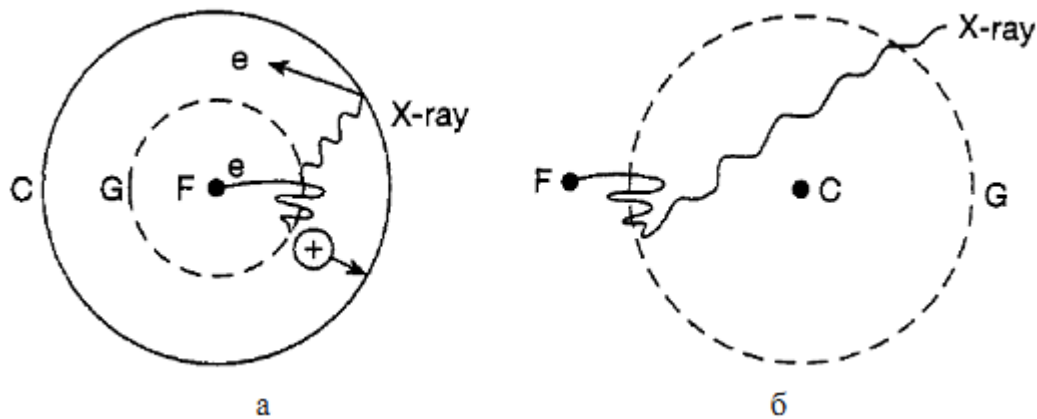


Рис. 9. Традиційний іонізаційний датчик - а, лампа Байярда-Альперта - б

Спочатку конструкція датчика мала циліндричну симетрію (рис. 9, а). При цьому катод розміщався на осі циліндра, а колектор являв собою зовнішню суцільну циліндричну поверхню. Таке розташування електродів дозволяє проводити вимірювання тиску не нижче 10^{-7} Тор. Основним фактором, обмежування діапазон вимірюваних тисків, є поява струмів, пов'язаних з іонізацією молекул електронним ударом. Головним механізмом появи паразитного струму є наступний фактор. У лампі Байярда-Альперта (рис. 9, б) цей ефект істотно зменшено за рахунок того, що колектор являє собою тонкий провідник, розташований на осі циліндричної сітки. Катод при цьому розташовується зовні сітки. Оскільки площа колектора набагато менша, ніж у традиційної іонізаційної лампи, то ймовірність вибивання фотоелектронів нижче, а, отже, нижче паразитний струм, що викликається рентгенівським випромінюванням.

Діапазон тисків, що вимірюються за допомогою лампи Байярда-Альперта, складає $10^{-3} - 10^{-10}$ Тор.

екстраторні вакуумметри

Завдяки спеціальній іонній оптиці, потік іонів передається на колектор, розташований в зоні тіні для рентгенівських променів. Одна з можливих конструкцій екстракторного вакуумметра була запропонована Хелмером і Хайвардом і представлена на рис. 10. У цьому датчику потік іонів відхиляється на 90° в циліндричному конденсаторі та потрапляє на колектор іонів. Перед колектором також розташована додаткова сітка, що пригнічує появу струму вторинних та фотоелектронів з колектора. Нижня межа вимірювань екстракторних вакуумметрів становить близько $10\text{-}12$ Тор.

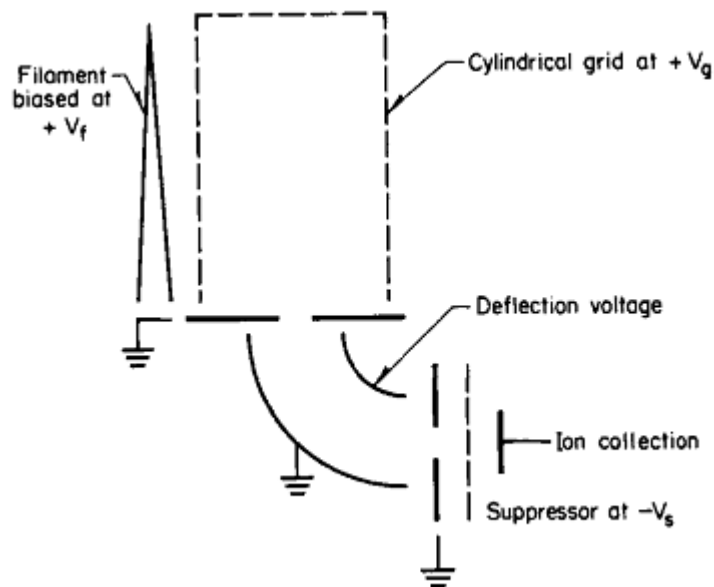


Рис. 10. Датчик екстракторного вакуумметра

Датчики с холодным катодом

Анод у вигляді короткої трубки під потенціалом 2-3 кВ розташовується між двома заземленими круговими катодами. Для збільшення довжини пробігу електронів і, відповідно, зменшення тиску, при якому можливий самостійний газовий розряд, застосовується сильне магнітне поле $\sim 0,1$ Тл, спрямоване вздовж осі симетрії датчика Датчик Пеннінга дозволяє проводити вимірювання тиску в діапазоні від 10^{-2} до 10^{-6} Торр.

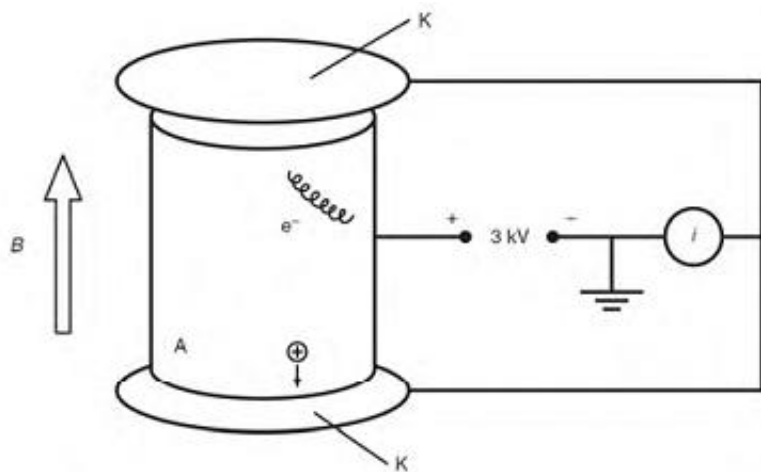


Рис. 11. Вакуумметр Пеннінга

Інверсно-магнетронний вакуумметр

Датчик цього вакуумметра, що має циліндричну симетрію, поміщається в сильне поздовжнє магнітне поле, спрямоване вздовж осі. Центральний електрод А в виді стрижня грає роль анода і перебуває під позитивним потенціалом порядку кількох кіловольт. Електрод З у вигляді порожнистого циліндра знаходиться під нульовим потенціалом і виступає у ролі катода. Додатковий електрод G, що знаходиться під потенціалом катода, запобігає поява на катоді паразитного струму, спричиненого автоелектронною емісією, розташованого на осі. В описаній конфігурації заряджені частки рухаються в радіальному електричному та аксіальному магнітному полі.

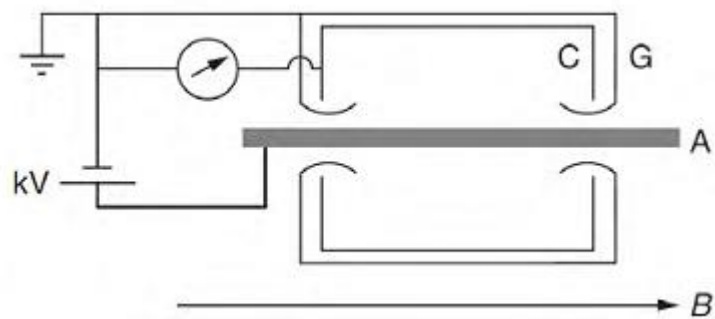


Рис. 12 Інверсно-магнетронний вакуумметр

Вакуумметри з холодним катодом мають точність порівнянну з вакуумметрами з гарячим катодом, але більш надійні в експлуатації завдяки відсутності розпеченого катода, здатного перегорати. Основними недоліками датчиків з холодним катодом є наступні:

- Висока швидкість відкачування датчиком ($\sim 0,1\text{--}1$ л/с), що призводить до появи різниці тисків у датчику та вакуумній системі.
- При малих тисках великий час встановлення струму (близько 30 с при тиску 10^{-9} Торр).
- Наявність магнітного поля, здатного впливати на електронні струми вакуумі.

Крім цього, через відмінності в перерізах іонізації молекул різних газів, всі датчики, принцип роботи яких заснований на іонізації молекул, видають показання, що залежать від складу газу. Всі іонізаційні вакуумметри для проведення абсолютних вимірів вимагають проведення калібрування.

Вакуумметр з ротором, що обертається.

Принцип дії даного приладу ґрунтується на залежності в'язкості газу від тиску. Вперше конструкція такого вакуумметра була запропонована 1962 року. Пристрій вакуумного датчика схематично представлено на рис. 13.

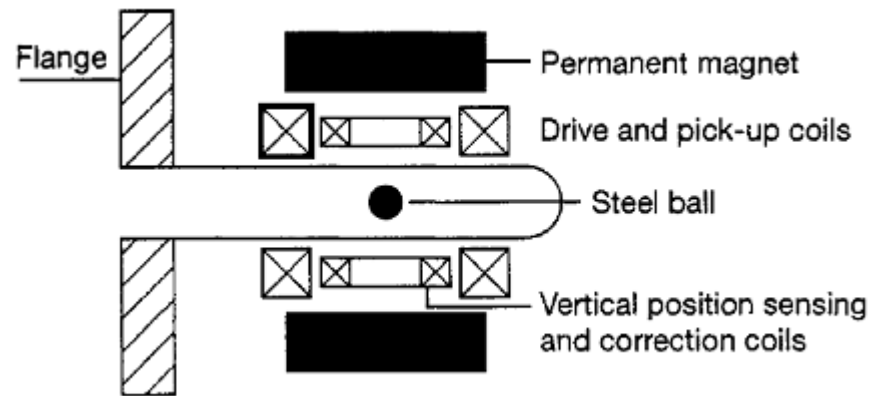


Рис. 13. Пристрій датчика тиску з ротором, що обертається.

В якості обертового ротора в ньому виступає сталева кулька діаметром близько 4,5 мм, підвішений у магнітному полі в горизонтальній немагнітній трубці з нержавіючої сталі, з'єднаної з вакуумною установкою. Для вимірювання тиску кулька спочатку розкручується обертовим магнітним полем до частоти ~ 400 Гц, після чого воно відключається. Швидкість обертання кульки, що реєструється котушками за частотою змінного магнітного поля кульки, поступово знижується через сили тертя між поверхністю кульки та газом.

Вид датчика	Тиск що вимірюється, Тор	Точність, %	Ціна, USD	Переваги	Недоліки
Рідинний	$10^3 - 1$	5-10	<250	Простота, абсолютні покази	Можливе забруднення вакуума парами
Мак Леода	$10^3 - 10^{-6}$	5-10	100-2000	Широкий діапазон тисків, що вимірюються	Неможливість безперервних вимірювань
ТрубкаБурдона	$10^3 - 1$	10	<250	Простий і надійний	Висока похибка
Діафрагмовий	$10^3 - 10^{-1}$	10	25-1000	Датчик загального призначення	Помітний дрейф нуля
Термопарний	$10 - 10^{-3}$	20	250-1000	Простий, надійний, недорогий	Інерційність, залежність показів від типу газу
Пірані	$10^3 - 10^{-3}$	10	1000-2000	надійність	Дрейф нуля при забрудненні

ДЯКУЮ ЗА УВАГУ!!!