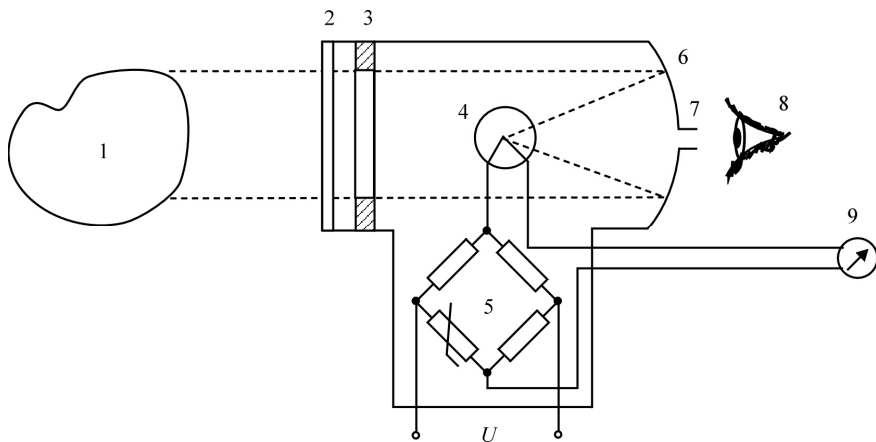


а)



б)

Рис. 2.20 – Принципові схеми пірометрів повного випромінювання:

а) рефракторного; б) рефлекторного

У рефлекторному телескопі (рис. 2.20, б) випромінювання через інфрачервоний фільтр 2 і діафрагму 3 попадає на рефлектор (увігнуте дзеркало) 6, відбивається, а потім фокусується на гарячих спаях термобатарей 4. Місток 5 з мідним опором служить для автоматичного уведення виправлення на температуру вільних кінців, що знаходяться в корпусі. Візування телескопа здійснюється спостерігачем 8 через отвір для візування 7.

Пірометри повного випромінювання, що випускаються серійно, типу АПІР-С призначені для виміру температури в діапазоні від 30 до 2500 °С. Спеціально виготовлені пірометри застосовуються в інтервалі від –100 до 3500 °С. У систему АПІР-С входять також пірометри часткового випромінювання зі спектральним діапазоном сприйманого випромінювання 0,7–1,1 і 0,8–1,8 мкм і тому псевдотемператури, вимірювані цими пірометрами, не порівняні ні з  $T_p$ , ні з  $T_y$ .

Для зменшення методичної похибки пірометрів повного випромінювання, викликану невизначеністю інтегрального коефіцієнта теплового випромінювання, часто в промислових умовах створюються умови, що наближаються до випромінювання чорного тіла. Наприклад, для виміру температури поверхонь використовуються вогнетривкі чи металеві блоки (рис. 2.21, а), для виміру температури газів і рідких середовищ – вогнетривкі трубки (рис. 2.21, б), на денце яких візується телескоп пірометра.

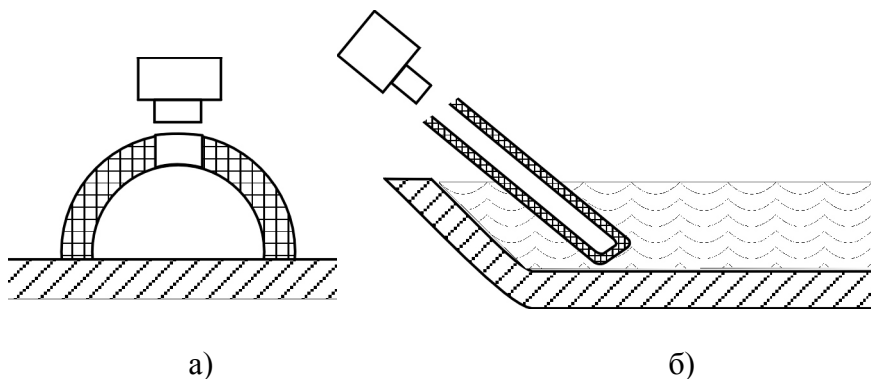


Рис. 2.21 – Пристрій для наближення випромінювання реальних тіл до випромінювання чорного тіла:

а) порожнина чорного тіла; б) чорна трубка

За певної шорсткості поверхні чи блока трубки і за малого відношення  $d/l$  коефіцієнт теплового випромінювання такої штучної порожнини чорного тіла наближається до 1, і немає

необхідності уводити виправлення в показання пірометра на нечорність випромінювання, тому що псевдотемпература, що показується пірометром, буде практично дорівнювати дійсній температурі тіла.

**Термометри і пірометри для спеціальних вимірів температури.** Практичні виміри температури відрізняються надзвичайною розмаїтістю умов виміру і вимог, пропонованих до засобів виміру. Усе це змушує ретельно аналізувати й удосконалювати методи і засоби виміру стосовно конкретних умов і вимог. У більшості випадків намагаються використовувати термометри і пірометри, що серійно випускаються приладобудівними заводами. Однак у ряді випадків через особливості умов виміру температури застосовуються термометри спеціального призначення. Деякі з найбільш характерних особливих умов виміру, застосовані методи і засоби виміру розглянуті нижче.

***Вимір температури поверхонь.*** Вимір температури поверхонь здійснюється як контактними, так і безконтактними методами. При вимірі температури поверхонь контактними термометрами звичайно існують дві проблеми: 1) забезпечення рівності температур термометра і вимірюваної поверхні; 2) виключення можливого перекручування температури чи температурного поля поверхні в місці виміру термометром.

Для забезпечення рівності температур термометра і вимірюваної поверхні необхідно створити найкращі умови теплопередачі від поверхні об'єкта виміру до термометра. У зв'язку з цим навіть дуже малі повітряні зазори або шари матеріалів з низькою теплопровідністю між вимірюваною поверхнею і термометром можуть істотно спотворити результати виміру. Для забезпечення гарного теплового контакту бажано спеціально виготовлений термометр приклеювати, припаювати або приварювати до поверхні. Можливе механічне закарбування спаю на поверхні об'єкта, але тільки у випадку неокислюваності поверхонь об'єкта і термометра в умовах виміру.

Перекручування температури чи температурного поля поверхні об'єкта виміру буде відбуватися в тому випадку, якщо термометр служить причиною додаткового підведення чи

відведення теплоти від вимірюваної поверхні. У зв'язку з цим намагаються створити такі умови, щоб не було додаткового теплообміну в місці виміру температури поверхні. Іноді, коли не можна уникнути теплообміну через термометр, намагаються перенести цей теплообмін із точки (місця) виміру температури в іншу точку. На рис. 2.22 показана зміна температури поверхні за рахунок відведення теплоти по електродах термоелектричного термометра. У точці торкання електродами поверхні А температура поверхні  $t'_n$  істотно відрізняється від значення  $t_n$ , що має місце удалині від точки А. У точці А температура  $t_n$  може навіть наближатися до температури навколишнього середовища  $t_{o.c.}$  На відстані  $l$  від точки А температура поверхні і рівна їй температура термометра мають значення  $t_T$ . Температура поверхні в точці виміру в цьому випадку практично дорівнює температурі поверхні без термометра.

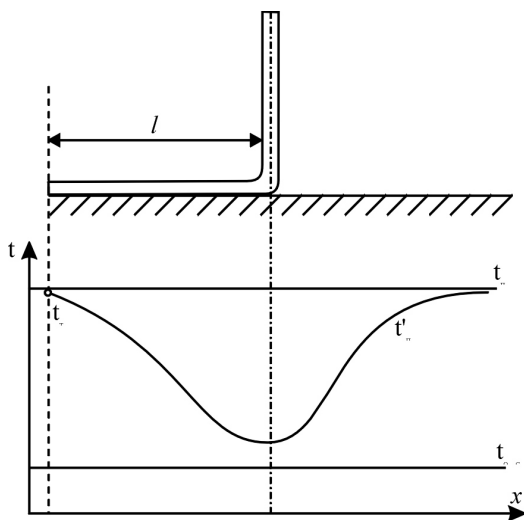


Рис. 2.22 – Зміна температури поверхні при відведенні теплоти по електродах термоелектричного термометра

Для безупинного виміру температури поверхні, наприклад, трубопроводу термометр часто притискають до поверхні спеціальним затиском (рис. 2.23). Наявність ізоляції трубопроводу

практично виключає відведення (чи підведення) теплоти від місця виміру, і тому термометр не спотворює температури поверхні, а гарний тепловий контакт між термометром і поверхнею шляхом затиску забезпечує рівність температур термометра і поверхні.

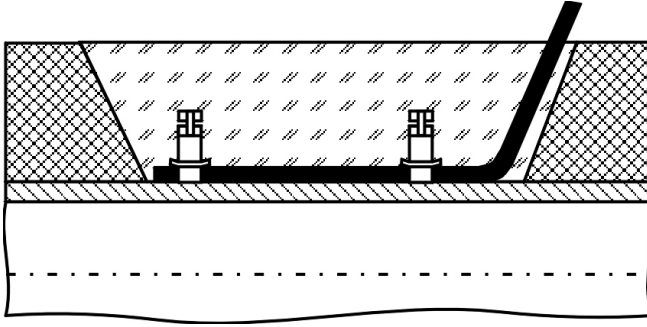


Рисунок 2.23 – Поверхневий термометр із затиском на трубопроводі

У лабораторних умовах і при дослідженнях особливо малі похибки мають місце при застосуванні плівкових термометрів, розташованих безпосередньо на вимірюваній поверхні. Ці термометри опору або термоелектричні термометри напиляють на вимірювану поверхню. Іноді застосовують додаткові покриття, щоб забезпечити ту ж випромінювальну здатність і теплопровідність, як і в інших ділянках поверхні, що прилягають до місця виміру. Слід мати на увазі, що часто термо-ЕРС і температурний коефіцієнт у дуже тонких плівок, напиляних на поверхню, будуть залежати від товщини напиленого шару, термічної обробки і теплового розширення матеріалу, на який виконувалося напилювання. Вимір температури поверхонь, що рухаються, має свої специфічні проблеми. Найкраще для цього застосовувати безконтактні методи виміру – за випромінюванням. Однак у багатьох випадках застосування безконтактного методу не може бути здійснено, тому що немає прямої видимості вимірюваної поверхні або його застосуванню перешкоджають інші причини. Тому досить широко застосовуються контактні

термометри. При цьому, як правило, виникає або проблема забезпечення теплового контакту між термометром і тілом, що рухається, або проблема передачі вимірювального сигналу з тіла, що рухається, на стаціонарну вимірювальну установку. Якщо термометр жорстко закріплений на вимірюваній поверхні (з урахуванням викладених вище особливостей виміру температури поверхонь) і його температура практично дорівнює температурі поверхні, виникає задача передачі показань термометра на стаціонарну вимірювальну установку. Це можна здійснити при малих поступальних переміщеннях гнучкими сполучними проводами. При обертальному русі передача сигналу здійснюється через обертовий контактний пристрій, найпростішим варіантом якого є контактні кільця. Прикладом може служити схема, зображена на рис. 2.24.

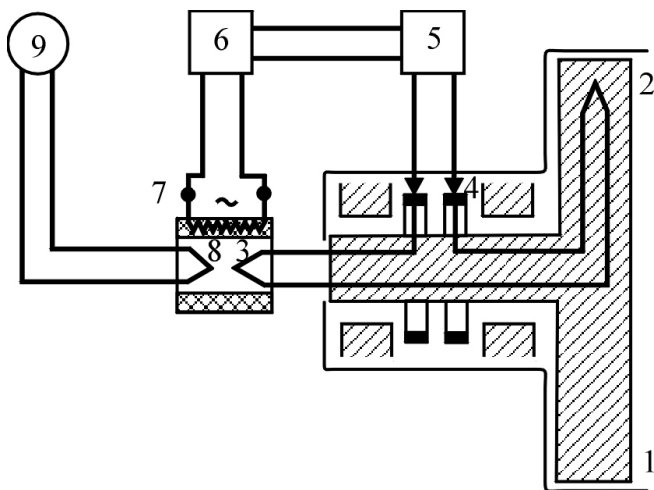


Рис. 2.24 – Схема виміру температури обертових деталей термоелектричним термометром

На обертовій деталі 1 розташований робочий спай термоелектричного термометра 2. Вільні кінці термометра утворюють інший спай 3 термометра, що обертається разом з деталлю.

У розрив одного з електродів через контактні кільця 4 включений електронний підсилювач 5. За наявності різниці температур спаїв 2 і 3 підсилювач 5 через електронний блок 6 змінює нагрівання печі 7, у якій знаходиться обертовий спай 3, доти, поки вимірювальний струм у ланцюзі не буде дорівнювати нулю, тобто поки температури спаїв 2 і 3 не будуть рівні. Температура в печі вимірюється термометром 8 і вимірювальним приладом 9. Вона буде дорівнювати температурі спаю 2. Відсутність струму в ланцюзі виключає вплив перехідних опорів контактних кілець. Передача сигналу може здійснюватися і безконтактним способом за допомогою телеметричної, найчастіше індуктивної, системи. Однак безконтактні системи для термоелектричних термометрів складні і не знайшли широкого застосування.

**Вимір температури полум'я.** Виміри температури полум'я мають свої специфічні особливості і труднощі. При виборі методу виміру аналізуються рівень вимірюваних температур, бажана точність і тип полум'я. Температура горіння природного газу, рідкого палива і вугілля, як правило, нижче 2100 °С. Виключення складає температура полум'я, збагаченого киснем, що може сягати великих значень. Температура смолоскипа чи полум'я в більшості промислових установок лежить в інтервалі 1600–1900 °С.

Полум'я являє собою частково прозоре середовище з просторовим температурним полем, що міняється в часі. Вимір температури полум'я може здійснюватися пірометрами випромінювання або контактними термометрами. При вимірі температури полум'я по випромінюванню відбувається просторове усереднення температури уздовж осі візування пірометра. На результати виміру будуть впливати випромінюючі компоненти (частки сажі, двоокис вуглецю, водяна пара та інші тверді частки), що знаходяться в полум'ї. Велике значення має вибір довжин хвиль, сприйманих пірометром. Невипромінюючі гарячі чи холодні зони газів принципово не можуть бути обмірювані пірометрами випромінювання без спеціального їх підфарбовування.

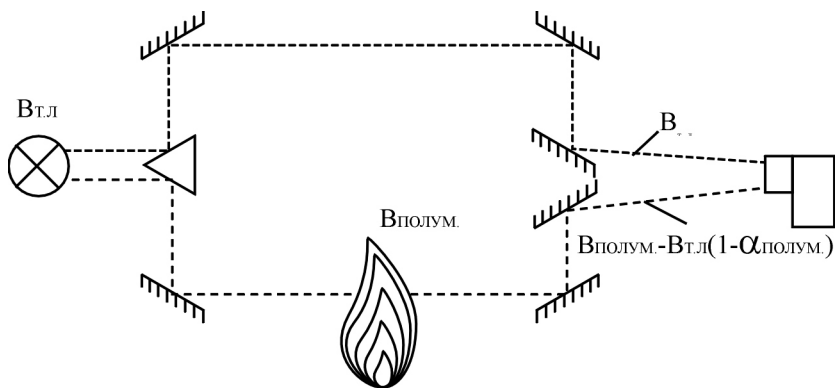


Рис. 2.25 – Вимір температури полум'я способом випромінювання-поглинання

Розглянемо деякі способи виміру температури полум'я із зазначенням їх особливостей і можливих похибок. Одним з цих способів є так званий спосіб випромінювання – поглинання. Ідея методу полягає у зрівнюванні спектральних енергетичних яскравостей температурної лампи, що спостерігається крізь полум'я і безпосередньо (рис. 2.25). Позначивши через  $B_{пл}$  – спектральну енергетичну яскравість полум'я, а через  $B_{т.л.}$  – спектральну енергетичну яскравість стрічки температурної лампи, можна записати, що спектральна енергетична яскравість стрічки лампи, що спостерігається крізь полум'я, становить:

$$B_{пл} + B_{т.л.}(1 - \alpha_{пл}),$$

де  $\alpha_{пл}$  – коефіцієнт поглинання полум'я (значення  $\alpha_{пл}$  невідомо).

Змінюючи температуру стрічки температурної лампи таким чином, щоб виконувалася умова:

$$B_{пл} + B_{т.л.}(1 - \alpha_{пл}) = B_{т.л.}$$



одержимо

$$B_{т.л} = B_{н.л} / \alpha_{н.л}.$$

Отже, температура полум'я дорівнює яскравісній температурі температурної лампи. Цей метод дозволяє залишати невідомим коефіцієнт поглинання полум'я, що у реальних умовах практично невизначений. Тому методична похибка є незначною. Однак практична реалізація методу на промислових установках пов'язана з труднощами здійснення такої оптичної системи, у якій обидва канали не тільки мали б однакові спектральні характеристики, а й однаково змінювали б їх у процесі експлуатації. Цей метод передбачає застосування квазімонохроматичного пірометра, і тому полум'я повинно випромінювати за тих самих довжин хвиль, за яких працює пірометр. У різновиді цього методу можливе застосування пірометрів повного випромінювання, однак у цьому випадку можуть мати місце методичні похибки, обумовлені відхиленням випромінювальних властивостей полум'я від сірого випромінювання.

Для виміру температури несвітлового полум'я або нагрітого газу застосовують метод звертання спектральних смуг. Для реалізації цього методу в полум'я вводяться солі натрію, наприклад поварену сіль, що офарблюють полум'я в жовтий колір. Далі використовують температурну лампу і спектропірометр і зрівнюють спектральну енергетичну яскравість за довжини хвилі випромінювання натрію для лампи і полум'я. Температура лампи буде дорівнювати температурі полум'я за рівності спектральних енергетичних яскравостей. В усіх цих випадках полум'я повинне бути не зовсім оптично щільним, щоб можна було спостерігати через нього.

Пірометри спектрального відношення можуть застосовуватися для виміру світлого полум'я, наприклад підсвіченого сажею. Слід зазначити, що застосування будь-яких методів виміру температури полум'я по випромінюванню вимагає попереднього дослідження спектральних характеристик полум'я й умов, у яких будуть проводитися виміри, з метою

виявлення факторів, що впливають на результати виміру (інших джерел випромінювання, проміжного середовища, пилу тощо).

Одним з недоліків виміру температури полум'я пірометрами випромінювання є усереднення температури уздовж оптичної осі. Тому не можна визначити, до якої точки полум'я відноситься отриманий результат. У цьому відношенні застосування невеликих за розмірами термоелектричних термометрів має істотні переваги. Однак температура такого термометра може істотно (на 100–200 °С) відрізнятись від температури газу, тому що вона буде визначатися за тепловим балансом термометра. У зв'язку з тим що розрахунок пов'язаний з необхідністю одержання додаткової інформації про швидкість газу (полум'я) у точці виміру, випромінювальних здібностях полум'я і термометра, одержали поширення способи виміру, які дозволяють виключити ці параметри з розрахункових виразів. Для цього застосовуються два термометри з різним діаметром термоелектродів (розміри спаю в цьому випадку повинні дорівнювати діаметру термоелектродів), що розташовуються практично в одній і тій же точці полум'я (газу). Тоді дійсна температура:

$$t_D = t_1(t_1 - t_2) / \left[ \left( \frac{d_2}{d_1} \right)^{0,6} \frac{T_2^4 - T_{cm}^4}{T_1^4 - T_{cm}^4} - 1 \right]. \quad (2.1)$$

Ці вирази передбачають теплообмін випромінюванням між термоелектродами і стінкою і не враховують теплообмін між термометром і полум'ям. Це справедливо для прозорих, несвітлових пламенів і газів. В оптично щільному полум'ї термометр «не бачить» стінок і тому застосовувати вираз (2.1) недоцільно. У зв'язку з цим запропоновано вимірювати температуру одним термометром, а виправлення оцінювати за залежністю (2.1).

**Вимір температур в енергетичних реакторах.** Вимір температур в енергетичних реакторах і активній зоні має свої

специфічні особливості. По-перше, це питання радіаційної безпеки, які вимагають застосування методів і засобів виміру температури, що відрізняються високою надійністю, по-друге, – забезпечення тривалої роботи засобів виміру температури зі стабільними чи практично стабільними градувальними характеристиками.

Питання надійності засобів виміру температури зводяться в основному до створення такої конструкції термометрів, що забезпечувала б безвідмовну роботу як протягом тривалої експлуатації, так і при аварійних ситуаціях.

Однією з найбільш важливих і самих тепло-напружених частин реактора є тепловиділяючі елементи (твेलі). Оскільки в них розташована речовина, що поділяється, то вони є і найбільш відповідальними частинами реактора. Припустимий рівень температури палива й оболонки визначається застосовуваними матеріалами. Товщина оболонок – від 0,1 мм для сталевих оболонок до 1 мм для цирконієвих сплавів. Значення температури залежно від виду реактора і його конструктивних особливостей складають від 350 до 1200 °С. Зниження температури оболонок щодо розрахункової приводить до падіння потужності реактора. Підвищення температури може викликати руйнування оболонок і привести до аварійної ситуації. Тому вимір температури оболонок твелів є однією з найважливіших задач виміру температури в енергетичних реакторах. Найбільш прийнятними для цієї мети є кабельні термоелектричні термометри, що мають підвищену стійкість до теплових ударів, вібрацій, механічних навантажень. Важливими достоїнствами кабельних термометрів є можливість одержання малих їх діаметрів їх (до 0,5 мм), різного поперечного перерізу – круглих, плоских, овальних тощо, а також можливість виготовлення перемінного за довжиною діаметра. Кабельні термоелектричні термометри мають достатню довжину і гнучкість для прокладки в самих важкодоступних місцях. Залежно від конструкції твелів застосовуються різні способи закладення кабельних термометрів в оболонку твелів. Це може бути закладення термометра 1 (рис. 2.26, а) у дистанціонуюче ребро 2 на оболонці 3 твела, у якому

знаходиться паливо 4. Можливе кріплення термометра 1 до оболонки 3 способом плазменого напилювання (рис. 2.26, б) та інші способи. Варіанти кріплення і розміри термометра визначаються конструкцією і розмірами оболонки твела, а також забезпеченням мінімального перекручування температури оболонки в місці виміру самим термометром і його кріпленням. Крім звичайних, випускаються кабельні багатозонні термоперетворювачі діаметром 3 і 6 мм із числом робочих спаїв 3 і 5, відстанню між спаями 1000 і 1500 мм і максимальною довжиною термоперетворювача 25 м.

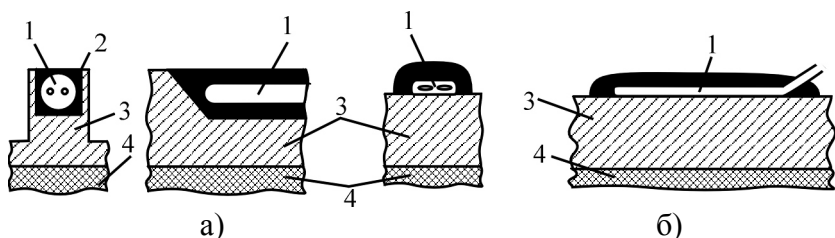


Рис. 2.26 – Термоелектричні термометри для виміру температури оболонок твелів:

а) забитий у дистанціонуюче ребро; б) закріплений плазменним напилюванням

Багатозонні кабельні термометри дозволяють вимірювати температури в різних точках активної зони (наприклад, розподіли температури графітової кладки реактора за висотою) одним термометром. Температура є важливим параметром, який характеризує властивості графітового сповільнювача. Особливості її виміру визначаються відносно високим значенням температури (до 800 °С), науглецюванням матеріалів конструкції термометра, опроміненням, що іонізує, і практичною неможливістю доступу до місць вимірів. Крім того, велике значення має вибір найбільш характерних точок виміру у графітовій кладці.

Для виміру максимальної температури графіту застосовується термоелектричний термометр 1, розташований за допомогою направляючого пристрою 2 у центрі каналу 3 осередку

графітової кладки (рис. 2.27). При цьому слід враховувати можливі методичні похибки, викликані термічним опором шару газу між робочим spaєм і поверхнею графітової кладки. Інші варіанти конструкції, що забезпечують безпосередній контакт із поверхнею графіту, не знайшли широкого застосування у зв'язку з ускладненням конструкції і зменшенням ресурсу роботи.

Для виміру температурних режимів пристроїв теплового і біологічного захисту, а також металоконструкцій реактора найчастіше застосовуються також кабельні термоелектричні термометри, що іноді армуються додатково захисним чохлам.

Велике число температурних вимірів у реакторах припадає на контроль температур теплоносія в різних точках першого і другого контурів. Для цього застосовуються різні конструктивні варіанти «класичних» термоелектричних термометрів: термоелектроди – ізоляційні намиста або трубки – захисна гільза. У зв'язку з вимогами радіаційної безпеки виникла необхідність розробити спеціальні конструктивні рішення герметичного виводу термоелектродів з реактора. Термоелектричні термометри укладені в герметичні трубки. Сполучні лінії термометрів виводяться через спеціальні патрубки, вмонтовані в отвори кришки. Кінці труб приварюються до трубної дошки. Для контролю ущільнення є відвід до сигналізатора протечок. При порушенні герметичності закладення труб вступає в роботу резервне ущільнення. Для умов вібрації розроблені високонадійні дугоподібні гільзи великої стійкості, що складаються з двох конічних частин і циліндричної частини малого діаметра (рис. 2.28). Для забезпечення герметичності контуру з активним середовищем і високої надійності засобів виміру широке застосування знаходять багатоелементні термометри і багатозонні кабельні термометри, які дозволяють скоротити число свердлінь у трубопроводах і ємностях устаткування АЕС.

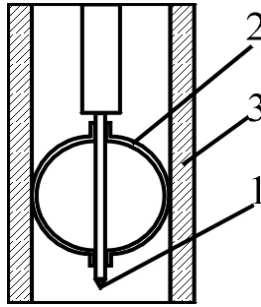


Рис. 2.27 – Вимірювання температури графітової кладки реактора

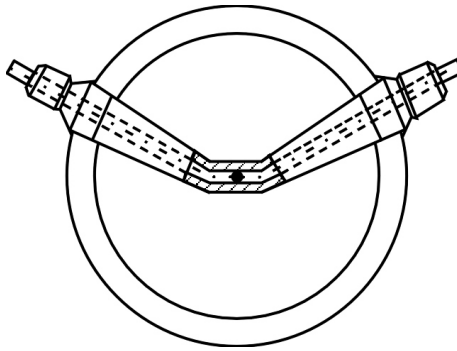


Рис. 2.28 – Термоелектричний термометр із дугоподібною гільзою

Як зазначалося вище, велике значення при вимірі температури в реакторах має питання стабільності градувальних характеристик засобів виміру в умовах іонізуючих випромінювань великої потужності. Термометри, розташовані в активній зоні піддаються впливу нейтронного потоку, осколків розподілу, електронів та інших часток, впливу  $\gamma$ -випромінювання. У результаті цього може відбуватися зміна структури, складу і відповідно зміна фізичних властивостей і метрологічних характеристик термометрів. У термоелектричних термометрах під впливом радіації можуть виникати тимчасові відхилення вихідного сигналу і тривалі, чи інтегральні, відхилення. Тимчасові відхилення спостерігаються в термометрах при впливі

випромінювання і зникають при припиненні випромінювання за незмінної вимірюваної температури. Тривалі чи інтегральні відхилення вихідного сигналу термометра мають місце при тривалому впливі випромінювання, коли термометр «набрав» певний флюенс випромінювання (кількість іонізуючих часток). Ці відхилення вихідного сигналу термометра залишаються і при припиненні випромінювання за постійної вимірюваної температури. Інтегральне відхилення викликається, як правило, радіаційним переродженням окремих елементів, що входять до складу термоелектродів. Це відхилення не може бути знято термообробкою електродів.

Як показали дослідження, тимчасові відхилення вихідного сигналу термоелектричних термометрів у більшості випадків не перевищують 1 % вимірюваної температури. Висловлюється припущення про те, що ці відхилення викликані розігрівом термометрів у результаті  $\gamma$ -опромінення. Зменшення цього відхилення досягається зменшенням радіального термічного опору термометра, а також зменшенням тепловиділення в самому чутливому елементі.

Аналіз інтегральних відхилень вихідних сигналів показав, що практично не мають інтегральних відхилень хромель-алюмелеві термоелектричні термометри, що піддавалися опроміненню з щільністю потоку іонізуючих часток до  $4,5 \cdot 10^{24} \text{ с}^{-1} \text{ м}^{-2}$  за температури 1000 °С. За тих самих умов інтегральні відхилення платинородій-платинових термометрів склали 30 °С. Ці результати підтверджуються дослідженням радіаційного переродження матеріалів термоелектродів через переродження родію. Найменша зміна складу відзначалася в парі хромель-алюмель, вона порозумівається стійкістю нікелю, що складає основу цих сплавів, до радіоактивного розпаду. Таким чином, застосування хромель-алюмелевих термоелектричних термометрів у реакторних вимірах дозволяє практично виключити інтегральні відхилення вихідного сигналу термометра.

Термометри опору для внутрішньореакторних вимірів практично не застосовуються, у зв'язку з істотною зміною електричного опору під впливом іонізуючих випромінювань.

У результаті ядерних перетворень електричний опір зростає, що приводить до завищення показань термометрів опору. Через кращу стабільність і більший діапазон виміру перевага віддається платиновим термометрам. Мідні термометри для виміру температур на АЕС не застосовуються.

**Вимір криогенних температур.** Криогенними називаються температури нижче 90 К. Вимір таких температур має свої специфічні особливості і труднощі, що зростають при наближенні до абсолютного нуля. Найбільшого поширення для виміру низьких температур одержали термометри опору і термоелектричні термометри. Термометри опору застосовують для виміру температур від 0,01–0,02 К і вище. Особливістю використання термометрів опору з металу є те, що опір термометра за низьких температур стає настільки малим, що утруднює їх вимір. При цьому зменшується коефіцієнт перетворення термометрів, що впливає на точність виміру. Зростає вплив дефектів кристалічних ґрат матеріалу термометра на його опір за низьких температур.

Зменшення теплоємності матеріалів за низьких температур може привести до істотної відмінності власної температури чутливого елемента термометра від температури вимірюваного середовища за рахунок самонагрівання і підведення теплоти по проводах і захисній арматурі.

З металевих термометрів широко застосовуються платинові термометри опору від 10 К і вище. В окремих роботах платинові термометри опору застосовувалися до 2 К. Для виміру низьких температур розроблена спеціальна конструкція платинового термометра опору (рис. 2.29). Платиновий дріт 1 діаметром 0,05 мм, покритий вініфлексним лаком товщиною 0,008 мм, намотується біфілярно на платиновий стрижень-каркас 2, один кінець якого запресований у спеціальний ізолятор 3. Платинові виводи 4 підключені до сполучних штирів 5. Стрижень і дріт покриті вініфлексним лаком, що створює надійну електричну ізоляцію і не взаємодіє з платиною. Для поліпшення теплообміну платиновий каркас-стрижень припаяний до металевого чохла. Для зменшення теплопритока ззовні застосовуються



сполучні проводи малого перетину (діаметр 0,1 мм). Термометр такої конструкції вийшов дуже мініатюрним: довжина чутливого елемента ( $R_0 = 100 \text{ Ом}$ ) термометр 8 мм, діаметр 1,6 мм, діаметр захисного чохла 2–3 мм. Інші термометри опору з металу в СРСР практично не застосовуються. За рубежом деяке поширення одержали нікелеві термометри опору (в інтервалі 77–300 К) і термометри з манганіну (в інтервалі 4,2–300 К).

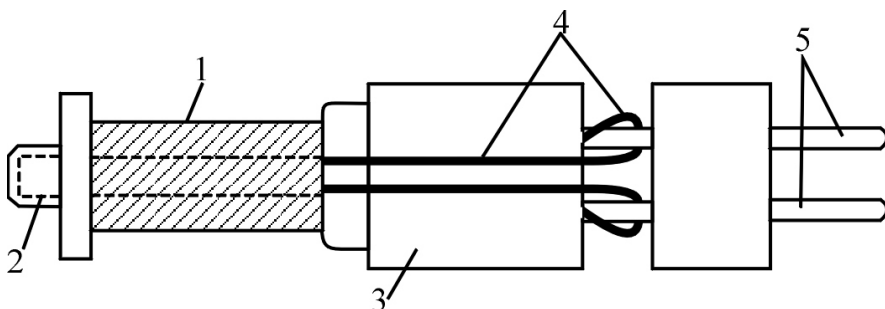


Рис 2.29 – Стрижневий платиновий термометр опору для виміру криогенних температур

Усі термометри з металів змінюють свій опір під впливом магнітного поля, причому чим нижче температура, тим більше цей вплив. Для платинового термометра цей вплив є найбільшим: за температури 13 К магнітна індукція до 2 Т викликає збільшення опору до 40%, при 50 К приріст опору за тої ж магнітної індукції складає частки відсотка. В інших термометрів опору з металу магніторезистивний ефект майже на порядок менше, але він має місце.

Для виміру температур нижче 13 К в основному застосовуються германієві термометри опору. Вони призначені для виміру температур в інтервалі від 0,1 до 300 К. Виготовляються вони з кристалічного германія з багатокомпонентним легуванням. Опір германія збільшується зі зниженням температури і за гелієвих температур обчислюється сотнями і тисячами Ом. Коefіцієнт перетворення за цих температур складає  $10^2$ – $10^3 \text{ Ом/К}$ . Серійні германієві термометри опору мають межу похибок, що

допускаються, 0,05-0,1 К. Еталонні германієві термометри опору мають стабільність градууювальної характеристики до 0,001 К. Хоча конструктивне виконання термометрів різне, але в загальному випадку кристал германія, до якого приварені виводи, поміщається в захисну гільзу (корпус), заповнену гелієм, що поліпшує теплообмін з вимірюваним середовищем. Германієві термометри опору також піддаються впливу магнітних полів. Цей вплив менший, ніж для платинових термометрів, але при полі в 10–15 Т похибка через їх вплив може скласти при 4,2 К близько 0,15–0,2 К і більше.

За наявності магнітних полів для виміру низьких температур доцільно застосовувати вугільні термометри опору. У вугільних термометрів вплив магнітних полів у 15 Т змінює їх показання не більше ніж на 4–7 % для температур від 0,01 до 1,5 К. Вугільні термометри опору так само як і германієві, мають негативний температурний коефіцієнт і виготовляються з кам'яного вугілля шляхом спеціальної термообробки. Одним з головних достоїнств вугільних термометрів є те, що їх коефіцієнт перетворення практично зворотно пропорційний температурі. Для малих об'єктів застосовують плівкові вугільні термометри опору, що виготовляються шляхом нанесення шару колоїдного розчину графіту на підкладку або безпосередньо на поверхню об'єкта. До числа недоліків вугільних термометрів слід віднести нестабільність їх градууювальної характеристики.

З термоелектричних термометрів найбільшого поширення для виміру температур від 20 до 300 К одержав мідь-константановий термометр. Однак його коефіцієнт перетворення істотно зменшується з пониженням температури. Якщо за кімнатних температур він становить близько 40 мкВ/К, то при 20 К він вже складає тільки 5 мкВ/К. Тому вимірювання цим термометром при 20 К сполучено з труднощами, а за більш низьких температур є практично неможливим.

Деяке поширення одержав термометр мідь-(золото + 1,9% кобальту). Однак стабільність цього термометра невисока. Крім того, значний вплив мінливості температури вільних кінців на показання термометра. Для промислових вимірів в інтервалі

від 1 до 50 К добре зарекомендував себе термометр (золото + 0,07% заліза)-хромель, що має практично лінійну характеристику при гарній стабільності. Для зменшення похибки, викликані мінливістю температури вільних кінців, їх поміщають у середовище з температурою, близькою до вимірюваної, наприклад, у рідкий азот.

Однак, незважаючи на ряд переваг, термоелектричні термометри поступаються термометрам опору в точності й у стабільності градуовальної характеристики.

Манометричні термометри (газові і конденсаційні) досить широко використовуються для лабораторних і технічних вимірювань криогенних температур. Головною перевагою газових термометрів є можливість їх застосування без попереднього градування в широкій області температур. Наприклад гелієвий термометр може перекрити всю область температур від 90 до 1 К. Для точних вимірів необхідно враховувати відмінність властивостей реального газу, що заповнює термометр, від ідеального газу. Слід мати на увазі, що розміри термобалона є значними і можливий вплив температури навколишнього середовища, тому область застосування газових термометрів обмежена.

Конденсаційні термометри використовують експериментальну залежність тиску насиченої пари від температури. Діапазони виміру конденсаційних термометрів у криогенній області досить вузькі, наприклад для гелієвих термометрів 1–5 К, для водневих 15–35 К. Точність виміру температури залежить від точності визначення градуовальної характеристики термометра.

Термометри магнітної сприйнятливості застосовуються для виміру температур нижче 1 К. Необхідність проведення магнітних вимірів практично виключає можливість використання термометрів магнітної сприйнятливості в промислових установках. А необхідні розміри також обмежують область їх застосування.

При вимірі криогенних температур велику увагу слід приділяти методичним похибкам виміру температури, що визначаються особливостями теплообміну чутливого елемента

термометра не тільки з вимірюваним середовищем, а й з навколишнім середовищем та елементами конструкції установки.

**Вимірювання температури розплавів.** Складність вимірювання температури розплавів визначається в основному активною корозією захисного чохла термометра. Методичні похибки при вимірі температури розплавів практично можна не брати до уваги, тому що тепловіддача від розплаву до чохла термометра, як правило, дуже добра. Виключення складають синтетичні матеріали великої в'язкості (пластмаси, синтетика, синтетичний каучук та ін.), у яких коефіцієнт тепловіддачі невеликий. Конструкція термометра в цьому випадку повинна забезпечити необгорнуватість термометра матеріалом і мінімальною похибкою шляхом тепловідводу через чохол. На рис. 2.30 представлений один з варіантів такого термометра, що складається з чутливого елемента в тонкому чохлі 1 і власника 2 обтічної форми.

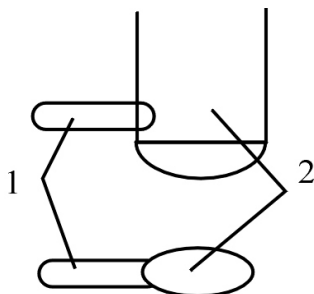


Рис. 2.30 – Термометр для виміру температур розплавів синтетичних матеріалів

При вимірі розплавів солей захисні чохла через кілька десятків годин виходять з ладу через агресивну дію розплаву. Тому часто роблять легко змінюваний чохол з неякісної дешевої сталі, наприклад термометр із товстостінним захисним чохлам зі звичайної дешевої сталі, що одночасно є одним з електродів термоелектричного термометра.

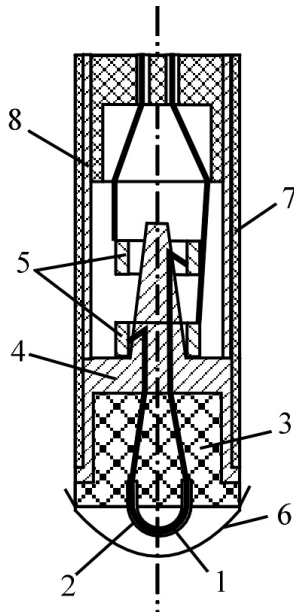


Рис. 2.31 – Термометр для виміру температур розплавів сталі і кольорових металів

Для виміру розплавів скла можуть застосовуватися захисні чохла з вуглецевих блоків або зі шляхетних металів. Графітові (вуглецеві) захисні чохла застосовуються для виміру температури у ванних печах. У середині графітового чохла повинен бути розташований газощільний внутрішній чохол для захисту термопари зі шляхетних металів від впливу відбудованої атмосфери вуглецю. Термометри такої конструкції мають велику теплову інерцію.

У живильних пристроях, де на поверхні розплаву скла є окисна атмосфера, можуть застосовуватися чохла зі шляхетних металів або комбіновані. Термоелектроди в порцеляновій ізоляційній трубці містяться в захисному чохлі з платини. Зовні розташовуються керамічний захисний чохол і монтажна сталева трубка, що кріпиться до головки термометра. Такий термометр відрізняється малою інерційністю.

Вимір температури розплавів кольорових і легких металів також викликає великі труднощі через сильну корозію металевих захисних чохлах. Кварцові чохла не придатні, тому що, з'єднуючись, наприклад, з окисом алюмінію, кварц перетворюється на низькоплавке скло. Рідкі мідні сплави відбирають у кварцу кисень, руйнуючи його структуру. Для деяких розплавів кольорових металів застосовуються чохла з хромистого чавуну. Широкого поширення для епізодичного виміру температури рідкої сталі і розплавів кольорових металів одержали термоелектричні термометри короткочасного занурення зі змінними блоками (рис. 2.31). Дуже тонка термопара 1 (діаметром 0,08–0,1 мм) розташована в кварцовій трубці 2 і за допомогою термоелектродів приєднана до пружинних контактних кілець 5. Термопара з кварцовою трубкою захищена від механічних ушкоджень тонкостінним захисним ковпачком 6. Змінний блок, що складається з пластмасового блоку 4, термостійкої замазки 3, термопари 1, трубки 2 і захисного ковпачка 6, вставляється в захисний чохол з багатошарового паперу 7 і одночасно контакти блоку з'єднуються з контактами основного переносного чохла 8. За температури 1600–1700 °С такий термометр може знаходитися 10–15 с у рідкій сталі. При цьому частина паперового чохла обгоряє, розплавляється захисний ковпачок, але інтервал часу 10 с достатній для надійного і точного виміру температури. Після виміру змінний блок разом з паперовим захисним чохлом знімають з основного чохла і заміняють новим. Для виміру застосовуються термометри платинородій-платинородієві (тип В) і вольфрамрений-вольфрамрениєві (ВР 5/20).

На даний час на ряді металургійних заводів застосовуються термоелектричні термометри для безупинного виміру температури розплавленої сталі. Термометр поміщається у водоохолоджувану захисну форму. Робочий спай вітчизняних термометрів захищений тришаровим наконечником: зовнішній шар – з металокераміки, внутрішній – з окису алюмінію, у проміжку – засипання з окису алюмінію, термоелектроди платинородій-платинородієві (ПР 30/6). У закордонних конструкціях застосовуються газощільні капіляри з глинозему і металокерамічний

чохол. Термометри для безупинного виміру температури розплавленої сталі часто оснащуються спеціальним приводом і можуть всовуватися у вимірюване середовище або висуватися з нього в процесі роботи сталеплавильного чи сталерозливного агрегату.

У зв'язку з малою надійністю контактних термометрів у розплавах для виміру температури рідкої сталі й інших розплавів часто застосовуються пірометри. Вид застосовуваного пірометра залежить від умов виміру. Наприклад, на конвертерах з донною продувкою можливо робити вимір через одне з дутевих сопел пірометром повного випромінювання, тому що випромінювальна здатність поверхні металу в цьому випадку мало відрізняється від одиниці. Однак температура металу в цьому випадку вимірюється безпосередньо в зоні реакції вуглецю з киснем і тому має більш високе значення, ніж середня температура металу в конвертері. Одночасні виміри дійсної температури розплаву термоелектричним термометром і яскравісної температури розплаву квазімонохроматичним пірометром дозволяють за температурою і коефіцієнтом теплового випромінювання робити висновок про якість сталі чи розплаву, про їх хімічний склад. Для зменшення впливу шлаку на показання може бути використаний пристрій для запам'ятовування пікових значень, що фіксують тільки значення вимірюваної температури металу.

Температура розплавленого скла може вимірюватися пірометрами повного чи часткового випромінювання, якщо товщина шару розплаву така, що скломаса непрозора для випромінювання. Відзначена ще одна властивість випромінювання скла: в інтервалі довжин хвилі від 4 до 8 мкм усі сорти скла мають коефіцієнт теплового випромінювання  $\varepsilon = 0,96$ . Тому пірометри часткового випромінювання, що працюють у цій області спектра, можуть бути відградуєвані у значеннях дійсної температури. Часто пірометр візується на дно керамічної калильної трубки, зануреної в розплав. У тій частині ванни, де немає смолоскипа, можливий вимір температури розплаву шляхом візування пірометра прямо на розплавлене скло. У цій частині

має місце рівність випромінювання між ванною і зводом, тому їх вплив на результати виміру буде відсутній.

Пірометри випромінювання можуть бути використані також для виміру температур пластмас та інших полімерних матеріалів. Спектральні характеристики більшості полімерних матеріалів мають характерні смуги поглинання, у яких коефіцієнт теплового випромінювання практично дорівнює одиниці, наприклад для полістиролу 3,4; 6,8 і 14,2 мкм; для полівінілхлориду 3,4; 7 і 8 мкм; для нейлону 3; 3,4; 6,2; 6,6 мкм тощо. Тому квазі-монохроматичні пірометри з ефективною довжиною хвилі, що відповідає одній з зазначених вище, можуть вимірювати відразу дійсну температуру. В окремих випадках при вимірі температури прозорих і напівпрозорих матеріалів перед пірометрами встановлюють фільтри, які виділяють ту чи іншу спектральну область, у якій ці матеріали мають випромінювальну здатність, близьку до абсолютно чорного тіла. На закінчення необхідно зазначити, що вибір того чи іншого методу виміру і його конструктивне виконання визначаються конкретними умовами виміру температури розплавів, їх взаємодією з різними матеріалами, їх випромінювальними здібностями та іншими фізичними і хімічними властивостями. І в кожному випадку може бути своє, відмінне від інших випадків рішення цієї проблеми.

## 2.2 Принципи вимірювання тиску, прилади для вимірювання тиску

### 2.2.1 Поняття тиск, одиниці виміру тиску

**Тиском** називають фізичну величину, яка дорівнює відношенню модуля сили  $F$ , що діє перпендикулярно поверхні, до площі  $S$  цієї поверхні.

$$p = \frac{F}{S}.$$



За одиницю виміру тиску в SI прийнятий тиск, що створює сила 1 Н на перпендикулярну до неї поверхню площею 1 м<sup>2</sup>. Ця одиниця називається Паскалем.

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н м}^{-2}$$

Найменування одиниці тиску дано на честь французького вченого Блеза Паскаля, який жив в середині 17 сторіччя.

Широко застосовуються кратні одиниці кПа, МПа. Допускається використання таких одиниць, як кілограм-сила на квадратний сантиметр (кгс·см<sup>-2</sup>), кілограм-сила на квадратний метр (кгс·м<sup>-2</sup>) і 1 Бар. Співвідношення між системними одиницями і несистемними таке:

$$1 \text{ Па} = 10^{-5} \text{ Бар} = 1,0197 \cdot 10^{-5} \text{ кгс} \cdot \text{см}^{-2} = 0,10197$$

$$\text{кгс} \cdot \text{м}^{-2} = 7,5006 \cdot 10^{-3} \text{ мм.рт.ст.}$$

На практиці застосовуються позасистемні одиниці тиску:

- фізична нормальна атмосфера;
- міліметр ртутного стовпа

$$1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 101325 \text{ Па} = 10 \text{ м в.ст.}$$

*Атмосферним* називається найбільший тиск, обумовлений вагою усього стовпа повітря від поверхні Землі до межі атмосфери. На рівні моря атмосферний тиск дорівнює 101325 Па. Зі збільшенням висоти над рівнем моря атмосферний тиск зменшується.

### 2.2.2 Прилади вимірювання тиску

Вимір тиску необхідний для управління технологічними процесами і забезпечення пожежо- та вибухобезпеки виробництва, наприклад, для контролю тиску вогнегасних речовини

в установках пожежогасіння, для сигналізації про спрацьовування установки й успішного випуску вогнегасної речовини і навіть у теплових пожежних сповіщувачах. Крім того, цей параметр використовується при непрямим вимірах інших технологічних параметрів: рівня, витрати, температури, щільності.

При вимірах розрізняють *абсолютний, надлишковий і вакууметричний* тиск. При цьому за нуль (початок відліку) приймають атмосферний тиск. Сума атмосферного і надлишкового тисків являє собою **абсолютний тиск**, тобто

$$P_{абс} = P_{атм} + P_{надл.}$$

Якщо абсолютний тиск менше атмосферного, то їхня різниця називається розрідженням або вакуумом:

$$P_{вак} = P_{атм} - P_{абс.}$$

Засоби виміру, призначені для виміру тиску і розрідження, називаються **манометрами**. Залежно від виду і величини тиску, що вимірюється, прилади для виміру тиску умовно поділяють на:

- вакуумметри- для виміру глибокого розрідження;
- напоромери- для виміру надлишкового тиску до 0,04 МПа;
- тягоміри – для виміру розрідження до 0,04 МПа;
- тягонапороміри – для виміру надлишкового тиску до 0,02 МПа і розрідження до 0,02 МПа;
- диференціальні манометри (дифманометри)- для виміру різниці (перепаду) тисків.

Принцип дії вимірювальних приладів базується на спроможності речовини (твердого, рідкого, газоподібного) опиратися прикладеному силовому впливу. Залежно від принципу, використовуюваного для перетворення силового впливу на чутливий елемент на показання або пропорційні зміни іншої фізичної величини, прилади виміру тиску розділяються на: рідинні; деформаційні; вантажопоршневі; електричні; іонізаційні; теплові.

**Рідинні манометри.** У основу роботи приладів покладений принцип сполучених посудин, у яких рівні робочої рідини збігаються за рівності тисків над ними, а за нерівності займають таке положення, коли надлишковий тиск в одній з посудин врівноважується гідростатичним тиском надлишкового стовпа рідини в іншому.

Існують такі види РМ: двотрубні, однотрубні, мікроманометри. Розглянемо роботу двотрубного манометра (рис. 2.32).

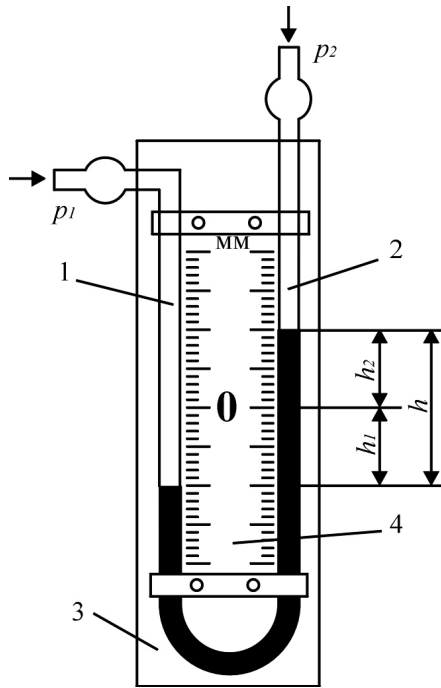


Рис. 2.32 – Схема двотрубного РМ

Дві вертикальні сполучені скляні трубки 1, 2 закріплені на основі 3, до якої прикріплена шкальна пластинка 4. Трубки заповнюються робочою рідиною до нульової позначки. У трубку 1 подається тиск, що вимірюється, трубка 2 сполучається з атмосферою.

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot h,$$

де  $\rho$  - щільність робочої рідини  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ;

$g$  - місцеве прискорення вільного падіння  $\text{м}\cdot\text{с}^{-2}$ .

Як робоча рідина використовуються вода, ртуть, спирт, трансформаторне мастило. Таким чином, чутливим елементом є робоча рідина, вхідним сигналом – тиск або різниця тисків, вихідним – різниця рівнів робочої рідини.

Манометри з водяним заповненням використовують для виміру тисків у діапазоні до 10 кПа, ртутні до 0,1 МПа.

Однотрубні (чашкові) манометри використовують для підвищення точності відліку різниці висот рівнів. У них одна трубка замінена широкою судиною, у яку подається більший з тисків, що вимірюються.

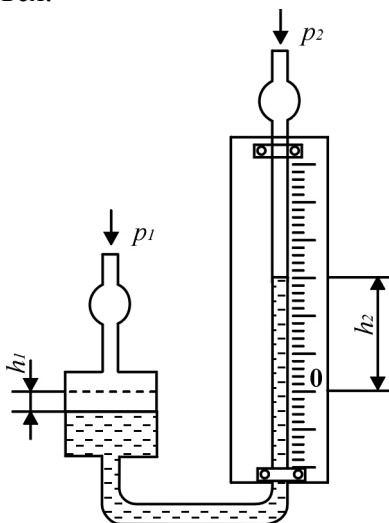


Рис. 2.33 – Однотрубний рідинний манометр

За умови, що площа поперечного перетину вимірювальної трубки  $f$  менше площі поперечного перетину широкої судини  $F$  більш ніж у 400 разів, то зміною рівня в широкій судині нехтують і для виміру тиску використовують

показання рівня у вимірювальній трубіці  $h_2$ . Для підвищення точності вимірів зміна рівня  $h_1$  враховується і шкала градується в одиницях тиску відповідно до рівняння:

$$p_1 - p_2 = \rho \cdot g \cdot (h_1 + h_2) = \rho \cdot g \cdot h_2 \left( 1 + \frac{f}{F} \right).$$

Вимір одного стовпа рідини призводить до зниження похибок зчитування, що з урахуванням похибки градування шкали не перевищує  $\pm 1$  мм, при ціні ділення 1 мм.

Мінімальний діапазон виміру однотрубних манометрів із водяним заповненням складає 1,6 кПа. Конструктивне виконання РМ залежить від статичного тиску, на який вони розраховані.

**Мікроманометри** використовуються для виміру тиску або різниці тисків до 3 кПа. Вони є різновидом однотрубних манометрів і споряджені спеціальними пристосуваннями для зменшення ціни ділення шкали, або для підвищення точності зчитування висоти рівня за рахунок використання оптичних та інших пристроїв (рис. 2.34).

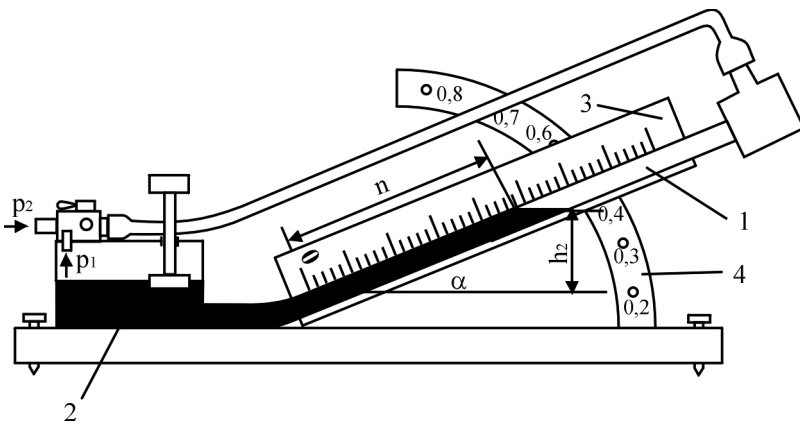


Рис. 2.34 – Схема мікроманометра ММН

РМ використовуються в лабораторній практиці та при проведенні промислових випробувань. Перевагами цих приладів є простота і надійність за високої точності вимірів.

**Деформаційні манометри.** Принцип роботи деформаційних приладів ґрунтується на залежності деформації чутливого елемента від тиску, що вимірюється. Деформація або сила пропорційна тиску, що вимірюється, перетворюється на показання або відповідні зміни вихідного сигналу. Більшість деформаційних манометрів і диференціальних манометрів містять пружні чутливі елементи, які здійснюють перетворення тиску на пропорційне переміщення робочої точки.

Найбільшого поширення одержали пружні чутливі елементи, такі як трубчасті пружини (рис. 2.35).

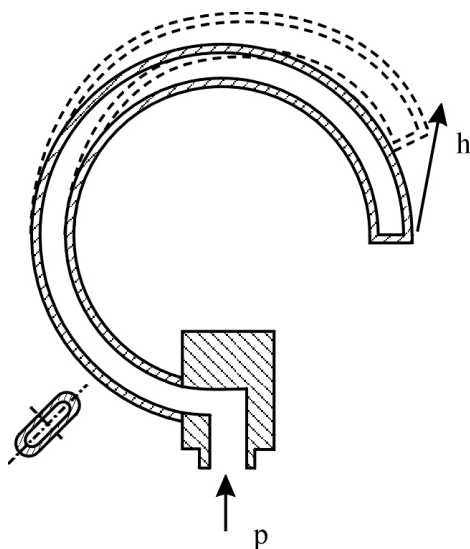


Рис. 2.35. Пружний чутливий елемент – трубчаста пружина

Статичній (пружній) характеристиці чутливого елемента, що зв'язує переміщення робочої точки з тиском, властива наявність початкової зони пропорційних переміщень робочої точки, у якій мають місце пружні деформації, і нелінійної ділянки, у

якій виникають пластичні деформації. Недосконалість пружних властивостей матеріалів чутливих елементів обумовлює наявність гістерезису статичної характеристики і пружна післядія. Останнє виявляється в запізнюванні переміщення робочої точки стосовно прикладеного тиску і повільному поверненні її в початкове положення після зняття тиску.

Форма і крутизна статичної характеристики залежать від конструкції чутливого елемента, матеріалу, температури. Робочий діапазон обирається в області пружних деформацій із забезпеченням запасу на випадок перевантаження чутливого елемента тиском. Пружні властивості чутливих елементів характеризуються коефіцієнтом жорсткості по силі:

$$k_F = \frac{F}{h} = \frac{p \cdot S}{h},$$

де  $F$ ,  $S$  – відповідно сила, що діє на пружний чутливий елемент (перестановочне зусилля), і ефективна площа елемента;

$h$  – переміщення робочої точки.

Порожнисті одновиткові трубчасті пружини (рис. 2.35) мають еліптичний або плоскоовальний перетин. Один кінець пружини, у який надходить тиск, що вимірюється, закріплений нерухомо у тримачі, другий (закритий) може переміщатися. Під дією різниці внутрішнього тиску, що вимірюється, і зовнішнього атмосферного трубчаста пружина деформується: мала вісь перетину трубки збільшується, велика зменшується, при цьому пружина розкручується і її вільний кінець здійснює переміщення в 1-3 мм. Для тисків до 5 МПа трубчасті пружини виготовляють із латуні, бронзи, а для більш високих тисків – з легованих сталей і сплавів нікелю.

**Трубчато-пружинні манометри.** Схема трубчато-пружинного манометра, що показує, подана на рис. 2.36. Одновиткова трубчаста пружина 1 з одного кінця приварена до тримача 2, прикріпленого до корпусу манометра. Нижня частина

тримача закінчується шестигранною головкою і штуцером, за допомогою якого до манометра приєднується трубка, що підводить тиск. Вільний кінець пружини припаяно до пробки 3, що шарнірно з'єднується з повідком 4. При переміщенні вільного кінця пружини поводок повертає зубцюватий сектор 5 відносно осі О, викликаючи поворот шестерні (трибки) 6 і розташованої на одній осі з нею стрілки, що показує 7. Пружина, не показана на рисунку, забезпечує підгортання зубців трибки до зубців сектора, усуваючи люфт. Статична характеристика манометра може підбудовуватися шляхом зміни точки закріплення повідця 4 у прорізі сектора 5. На рис. 2.36 показане радіальне розміщення штуцера; випускаються також манометри з осьовим розміщенням штуцера.

Трубчато-пружинні манометри, що показують, випускаються з верхньою межею виміру від 0,1 МПа (1 кгс/см<sup>2</sup>) до 103 МПа (104 кгс/см<sup>2</sup>) відповідно до стандартного ряду. Пружинні вакуумметри мають діапазон виміру 0,1-0 МПа, а мановакуумметри за нижньої межі виміру 0,1 МПа мають верхню межу виміру за надлишкового тиску від 0,1 до 2,4 МПа. Зразкові пружинні манометри, що показують, мають клас точності 0,15; 0,25 і 0,4; робочі манометри – 1,5; 2,5; 4, робочі манометри підвищеної точності – 0,6 і 1.

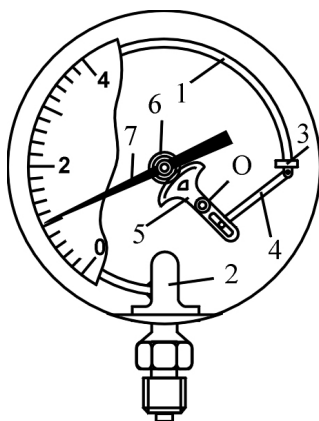


Рис. 2.36 – Трубчато-пружинний манометр, що показує



Промисловістю випускаються механічні манометри, що показують і самописні з одновитковою (типу МТ) і багатовитковою (типу МТМ) трубчастою пружиною. Принципова схема останнього приведена на рис. 2.37. Під дією тиску, що вимірюється, вільний правий кінець трубчастої багатовиткової пружини 1 переміщається, викликаючи поворот осі 2 і розташованого на ній важеля 3. Останній сполучений із тягою 4, що за допомогою важеля 5 повертає вісь  $y$ , на якій насаджений П-подібний важіль 7, що закінчується ручкою 8. У приладах, що показують, на вісь 6 насаджений важіль 9, тягою сполучений із сектором, що переміщують трибку стрілки показчика. Дисконна діаграма 10 здійснює один оборот за 12 або 24 годин, її обертання здійснюється електричним двигуном або годинним механізмом. Клас точності манометрів, що показують, та самописних – 1; 1,5, вони відносяться до числа великогабаритних приладів, розміри яких визначаються діаметром дисконна діаграми.

Манометри, що показують та самописні можуть містити додаткові пристрої, що здійснюють замикання електричного ланцюга за певного значення тиску, що вимірюється, перетворення переміщення кінця трубчастої пружини в пропорційний електричний або пневматичний сигнал.

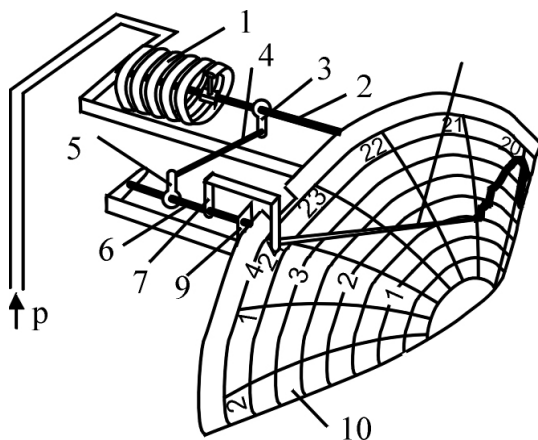


Рис. 2.37 – Самописний манометр типу МТС

Для сигналізації граничних відхилень тиску в ланцюгах захисту і позиційного регулювання широко застосовуються електроконтактні манометри. Схема манометра типу ЕКМ подана на рис. 2.38. У манометр додатково введемо дві стрілки 2, 3, до яких пружними струмопідводами притиснуті електричні контакти 4. Стрілки 2, 3 за допомогою торцевого ключа і повідця 5 установлюються проти значень тиску, що сигналізується. Стрілка 1, що показує, також оснащена електричним контактом 6. Якщо тиск знаходиться в межах робочого діапазону, то електричні ланцюги сигналізації розімкнуті. При досягненні стрілкою, що показує, будь-якого з контактів замикається електричний ланцюг, викликаючи спрацьовування сигналізації. Електричні контакти залишаються замкнутими при знаходженні стрілки, що показує, за межами робочого діапазону тиску, оскільки стрілки 2, 3 обмежують зсув контактів у середину робочого діапазону, а поза ним контакти захоплюються стрілкою, що показує 1. Клас манометрів і вакуумметрів 1,5; межі виміру відповідають стандартному ряду.

На рис. 2.39 подана схем трубчато-пружинного манометра МЕД із диференційно-трансформаторним перетворювачем 1, що має на виході сигнал перемінного струму частотою 50 Гц.

Випускаються модифікації манометрів МЕД із відліковим пристроєм, клас точності обох модифікацій 1, верхні межі виміру – від 0,1 до 160 МПа за стандартним рядом. На даний час на базі манометрів МЕД розпочато випуск манометрів МП, що мають на виході уніфікований сигнал у вигляді зміни струму. Для його одержання в прилад уведений підсилювач, що перетворює зміни взаємної індуктивності в пропорційний сигнал зміни струму. Гранична приведена похибка не перевищує 1%.

У перетворювачах тиску, що мають на виході уніфікований сигнал зміни струму і пневматичний сигнал, часто використовується принцип статичного зрівноваження.

Схема трубчастого пружинного манометра з компенсацією магнітних потоків типу МПЕ подана на рис. 2.40. Вільний кінець манометричної пружини 1 пов'язаний із постійним магнітом 2, що переміщається між двома магнітопровідниками 3.

У результаті взаємодії поля постійного магніту 2 із полями, утворюваними обмотками порушення і зворотного зв'язку, на вході підсилювача виникає небаланс вимірювального моста, що перетворюється у вихідний уніфікований сигнал.

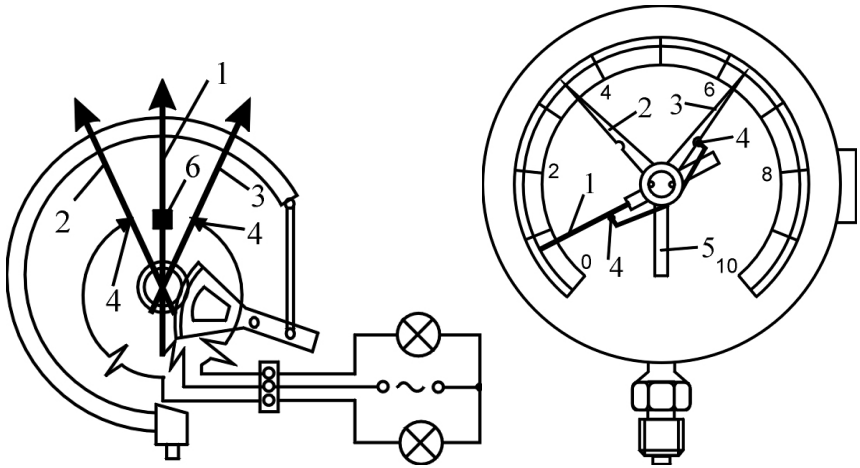


Рис. 2.38 – Електроконтактний манометр

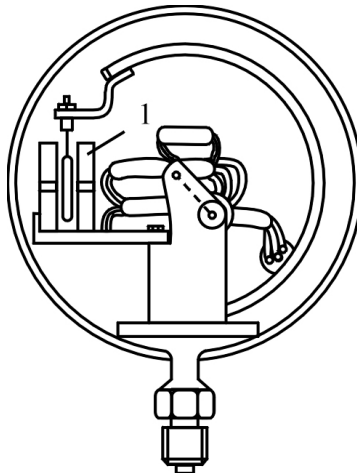


Рис. 2.39 – Схема манометра МЕД із диференційно-трансформаторним перетворювачем

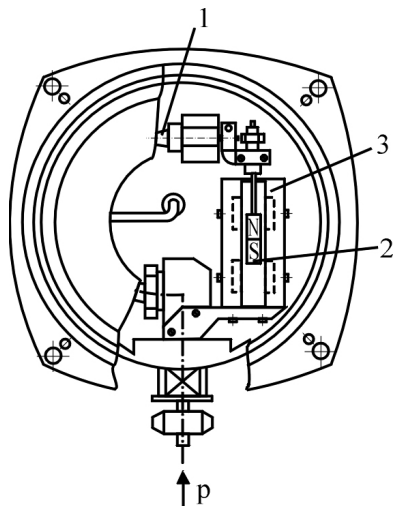


Рис. 2.40 – Схема пружинного манометра МПЕ

Оскільки в манометрах МПЕ негативний зворотний зв'язок використовується для компенсації магнітного потоку постійного магніту, пружний чутливий елемент і магнітний перетворювач не охоплені зворотним зв'язком. У зв'язку з цим зміна характеристик пружного чутливого елемента і магнітних перетворювачів у прямому каналі й у ланцюзі зворотного зв'язку впливають на коефіцієнт передачі перетворювачів тиску.

Манометри МПЕ випускаються відповідно до стандартних рядів із верхніми межами виміру від 4 до 60 МПа, на виході прилади мають уніфікований сигнал зміни струму 0 – 5 м при опорі навантаження до 2,5 кОм, клас 1.

Перетворювачі тиску із силовою компенсацією характеризуються збільшенням числа елементів, охоплених зворотним зв'язком. Схема пружинного манометра із силовою компенсацією типу МПЕ подана на рис. 2.41, а.



Зусилля від манометричної пружини 1, прикладене до Т-подібного важеля 2, компенсується зусиллям від електросилового механізму зворотного зв'язку, що включає постійний магніт 7 і рухливу котушку 8, обтічну вихідним струмом 1. Початкова установка підйомної системи проводиться пружиною 3, зміна натягу якої здійснюється через отвір 9 у кришці приладу (рис. 2.41, б).

За нерівності моментів, що розвиваються манометричною пружиною й електросиловим механізмом зворотного зв'язку, важелі 2, 4 разом із рухливою опорою 5 переміщуються, при цьому відхиляється сердечник диференційно-трансформаторного перетворювача 6, викликаючи послідовно зміни сигналу на вході і виході підсилювача УП, а також сили, що розвивається електросиловим механізмом зворотного зв'язку. Для зниження жорсткості рухливої системи усі важелі кріпляться на стрічкових опорах.

Перевагою перетворювачів із силовою компенсацією є те, що на коефіцієнт передачі не впливають характеристики чутливого елемента й елементів, охоплених зворотним зв'язком – диференційно-трансформаторним перетворювачем підсилювача. Це забезпечило можливість створення на розглянутому принципі дії зразкових перетворювачів тиску типу ИПД, що мають клас точності 0,06. Недоліком приладів із силовою компенсацією є їхня низька вібростійкість.

Манометри із силовою компенсацією типу МПЕ випускаються з верхньою межею виміру від 4 до 100 МПа вихідний сигнал – постійний струм 0 – 5 (20) м, сумарний опір навантаження не повинен перевищувати 2,5 кОм, клас точності 0,6; 1; 1,5.

З використанням однієї і тієї ж елементної бази випускаються трубчато-пружинні манометри з уніфікованим пневматичним вихідним сигналом 0,02-0,1 МПа (0,2-1,0 кгс/см<sup>2</sup>). Відмінність цих приладів від розглянутих вище полягає у використанні індикатора неузгодженості типу сопло – заслінка, пневмopідсилювача і сільфона зворотного зв'язку, що перетворює вихідний тиск на зусилля. Манометри пневматичні типу МП-П випускаються на ті ж межі виміру, що і МПЕ, клас точності

приладів 0,5; 1, тиск повітря, що живить, є 0,14 МПа, гранична довжина ліній зв'язку від перетворювача до повторного приладу складає 300 м.

**Мембрани, сільфони.** Сільфонні та мембранні чутливі елементи мають більш широкі можливості для збільшення ефективної площі, з метою одержання необхідного перестановочного зусилля, що дозволяє використовувати їх для виміру малих надлишкових тисків і розрідження. Сільфон (рис. 2.42) являє собою тонкостінну трубку з поперечними кільцевими гофрами на бічній стінці. Жорсткість сільфона залежить від матеріалу, з якого він виготовлений, зовнішнього й внутрішнього діаметрів, товщини стінки заготовки, радіуса заокруглення гофр  $r$  і кута їх ущільнення  $\alpha$ , числа гофр. Сільфони бувають суцільнотягнутими і зварними.

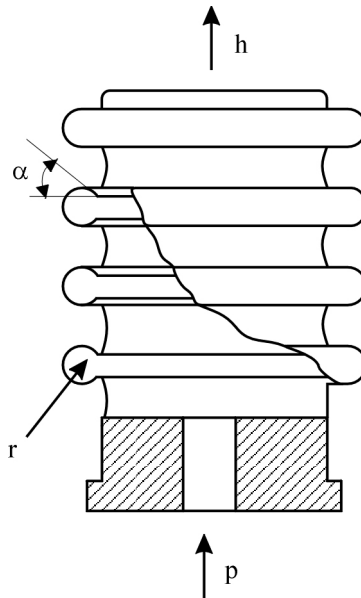


Рис. 2.42 – Принципова схема сільфона

Під дією тиску газу сільфон (рис. 2.43, а) розтягується, переміщуючи, наприклад, движок потенціометра. У результаті змінюється вихідний опір датчика.

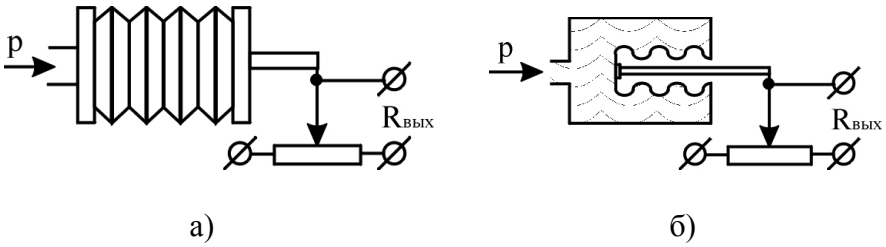


Рис. 2.43 – Датчики тиску:

а – сифонний для газів; б – сифонний для рідин

При вимірі тиску рідин застосовується інша конструктивна схема сифонного датчика (рис. 2.43, б). Рідина під тиском  $p$  надходить у порожнину сифона, який, зіщулюючись, переміщує движок потенціометра.

У даному сифоні сила тиску рідини ( $S_c p$ ) врівноважується сумарною силою: силою пружкості сифона ( $k_c l$ ), силою тертя  $\left( D \frac{dl}{dt} \right)$  та інерційною силою  $\left( m \frac{d^2 l}{dt^2} \right)$ . Прирівнюючи сили, отримаємо диференціальне рівняння:

$$m \frac{d^2 l}{dt^2} + D \frac{dl}{dt} + k_c l = S_c p,$$

де  $m$  – маса рідини в сифоні;  $l$  – переміщення рухливого краю сифона (движка потенціометра);  $D$  – коефіцієнт грузлого тертя;  $k_c$  – коефіцієнт пружкості сифона;  $S_c$  – площа сифона.

З попереднього рівняння можна отримати

$$\frac{m}{k_c} \frac{d^2 l}{dt^2} + \frac{D}{k_c} \frac{dl}{dt} + l = \frac{S_c}{k_c} p$$

або після введення позначень



$$\frac{1}{\omega_0^2} \frac{d^2 l}{dt^2} + \frac{2\xi}{\omega_0} \frac{dl}{dt} + l = Kp,$$

де  $\frac{1}{\omega_0} = \sqrt{\frac{m}{k_c}}$ ,  $\xi = \frac{D}{2\sqrt{k_c m}}$ ,  $K = \frac{S_c}{k_c}$ .

Мембрана, що являє собою тонку пластину, закріплюється на кінці трубопроводу (рис. 2.44). Під дією тиску рідини або газу жорсткий центр мембрани прогинається, переміщуючи движок вторинного вимірюючого приладу, наприклад, потенціометра. Через це змінюється вихідний опір датчика.

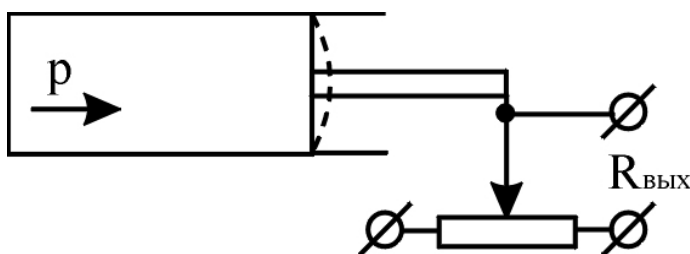


Рис. 2.44 – Мембранний датчик тиску

**Мембранні** чутливі елементи є найрізноманітнішими за конструкцією. Подана на рис. 2.45, а, б плоска або пластинчаста мембрана є гнучкою тонкою пластиною, закріпленою по окружності. Під дією різниці тисків, що діють по обидва боки на мембрану, її центр переміщується. Плоска мембрана має нелінійну пружну характеристику і малі переміщення робочої точки, у зв'язку з чим її в основному застосовують для перетворення тиску в силу (п'єзоелектричні перетворювачі) або поверхневі деформації (тензоперетворювачі).

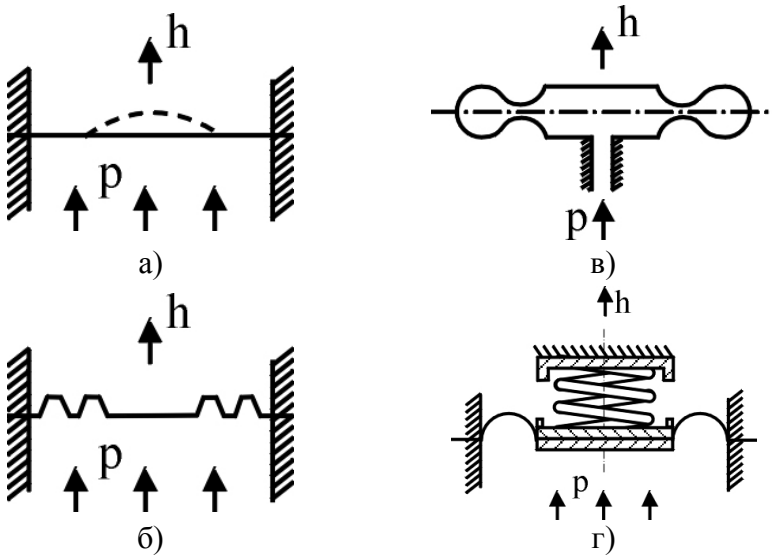


Рис. 2.45 – Мембранні чутливі елементи:

а), б) плоскі і гофровані мембрани; в) мембранні коробки; г) м'які мембрани з жорстким центром

Для поліпшення статичної характеристики використовують гофровані мембрани і мембранні коробки (рис. 2.45 в, г). Профілі мембран можуть бути пилкоподібними, трапецеоподібними, синусоїдальними. Гофрування мембрани призводить до збільшення її жорсткості, випрямлення статичної характеристики і збільшення зони пропорційних переміщень робочої точки. Більш широко використовуються мембранні коробки, що являють собою зварні або спаяні по зовнішньому краю мембрани. Жорсткість коробки вдвічі нижче жорсткості кожної з мембран. У дифманометрах як чутливі елементи регуляторів прямої дії використовуються мембранні блоки, що включають дві коробки і більше.

У напорометрах і тягометрах застосовуються м'які мембрани (рис. 2.45, г), виготовлені з бензомастилостійкої прогумованої тканини. У центрі мембрани кріпляться металеві

пластини, в одну з яких упирається гвинтова пружина, що виконує функції пружного елемента.

Пружні властивості матеріалів чутливих елементів залежать від температури: так, у трубчастих пружин температурний коефіцієнт зниження жорсткості за зростання температури сягає  $3 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ . Це визначає необхідність захисту приладів від впливу високих температур середовища, що вимірюється. З часом у пружних чутливих елементах накопичуються пластичні деформації та зменшуються пружні. Це призводить до зниження крутизни статичної характеристики приладу та її зсуву. Процес зміни статичної характеристики пришвидшується при підвищеній температурі та пульсації тиску, що вимірюється. Конструкція деформаційних манометрів і дифманометрів звичайно передбачає можливість корекції відхилень показань або вихідного сигналу, викликаних старінням пружного чутливого елемента.

**Вантажопоршневі манометри.** У вантажопоршневих манометрах тиск, що вимірюється, врівноважується силою ваги неушільненого поршня з вантажами. Манометри використовуються як зразкові засоби відтворення одиниці тиску в діапазоні від 10-1 до 1013 Па, а також для точних вимірів тиску в лабораторній практиці.

Схема поршневого манометра, що має діапазон виміру 6 МПа (МП-60), подана на рис. 2.46. Поршень 1 із тарілкою 2 для вантажів 3 переміщується всередині циліндра 4. Поршнева пара підганяється таким чином, щоб зазор між поршнем 1 і циліндром 4 не перевищував 0,01 мм. При такому зазорі навіть за високих тисків швидкість опускання поршня через відплив робочої рідини не перевищує 1 мм/хв. Для забезпечення рівномірного зазору між циліндром і поршнем останній у момент виміру обертають за годинниковою стрілкою. У манометрах із діапазоном виміру 0,6 МПа та вище обертання поршня здійснюються вручну.

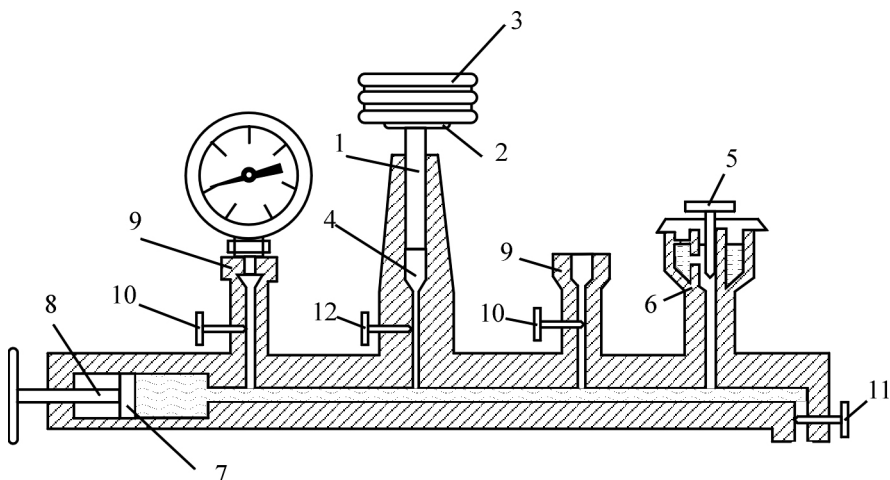


Рис. 2.46 – Схема вантажопоршневого манометра

**П'єзоелектричні манометри.** Принцип дії манометрів цього типу базується на п'єзоелектричному ефекті, сутність якого полягає у виникненні електричних зарядів на поверхні стиснутої кварцової пластини, що вирізається перпендикулярно до електричної осі кристалів кварцу. Схема п'єзоелектричного манометра подана на рис. 2.47. Тиск, що вимірюється, за допомогою мембрани 1 перетворюється в зусилля, що стискує кварцові пластини 2. Електричний заряд, що виникає на металізованих площинах 3 під дією зусилля  $F$  із боку мембрани 1, виражається виразом:

$$Q = k \cdot F = k \cdot S \cdot p,$$

де  $p$  – тиск, що діє на металеву мембрану 1 з ефективною площею  $S$ ;

$k$  – п'єзоелектрична постійна, Кл/Н.

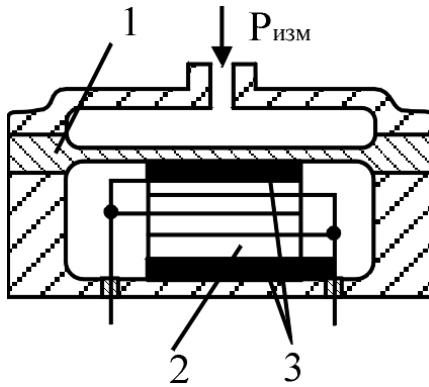


Рис. 2.47 – Схема п'єзоелектричного манометра

Напруга на вході підсилювача, підключеного до виходу п'єзоперетворювача, визначається загальною ємністю вимірювального ланцюга  $C$ :

$$u = \frac{Q}{C}.$$

П'єзоелектричний датчик являє собою кварцову пластину, на протилежні поверхні якої напилені (або приклеєні струмопровідним клеєм) електроди, до яких припаюються виводи (рис. 2.48). При стиску кварцової пластини силою  $P$  на її протилежних поверхнях, а отже, і на електродах, через прямий п'єзоелектричний ефект виникають електричні заряди. Розмір заряду пропорційний стискальній силі  $P$ , тобто

$$Q = dP,$$

де  $d$  – коефіцієнт пропорційності, який називають п'єзомодулем.

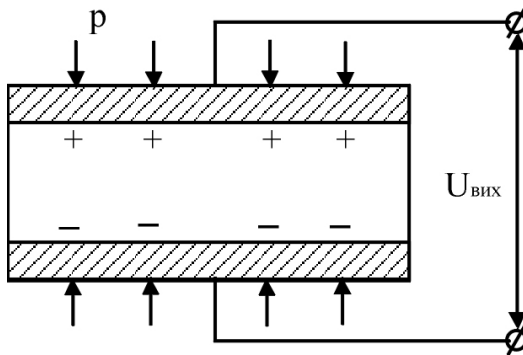


Рис. 2.48 – П'єзоелектричний датчик

За сили  $P$ , що змінюється, з'являється вихідна напруга:

$$U_{вих} = \frac{Q}{C_{\partial} + C_{м}} = \frac{d}{C_{\partial} + C_{м}} P,$$

де  $C_{\partial}$  – ємність датчика (конденсатора, утвореного електродами і кварцовим діелектриком);

$C_{м}$  – ємність монтажу.

З цієї формули очевидно, що, знаючи вихідну напругу, можна визначити силу  $P$ . Якщо  $P$  постійна, то  $U_{вих}=0$ . П'єзоелектричні датчики безінерційні. Вони використовуються для виміру сил, тисків, вібрацій і для інших вимірів, у яких прямо або побічно виявляються силові впливи. Вихідна напруга п'єзоелектричних датчиків від одиниць мілівольт до одиниць вольт. Для посилення вихідної напруги п'єзоелектричного датчика потрібно застосовувати підсилювач із дуже великим вхідним опором.

Кварц на відміну від інших сегнетоелектриків, що мають п'єзоєфект, є механічно міцним і має високу жорсткість, що виключає вплив пружної характеристики мембрани  $I$  на коефіцієнт передачі п'єзоелектричного перетворювача. Частота власних коливань перетворювача сягає десятків кілогерц,

унаслідок чого вони широко застосовуються при випробуваннях двигунів та на інших технологічних об'єктах, що характеризуються високочастотними змінами тиску.

П'єзоелектрична постійна кварцу, що складає біля  $2 \cdot 10^{-12}$  Кл/Н, відрізняється стабільністю і слабкою залежністю від температури, що дозволяє використовувати п'єзоперетворювачі для виміру тиску високотемпературних середовищ. Через вплив заряду п'єзоелектричні перетворювачі не використовуються для виміру статичних тисків. З метою підвищення чутливості декілька кварцових пластин включаються паралельно. Верхня межа виміру тиску в цих приладах сягає 100 МПа ( $1000 \text{ кгс/см}^2$ ).

**Манометри з тензоперетворювачами.** Манометри з тензорезистивними перетворювачами за швидкодією наближаються до п'єзоелектричних манометрів. Перші являють собою мембрани, на яких розміщені дровові, фольгові або напівпровідникові резистори, опір яких змінюється при деформації мембрани під дією тиску.

Дія вимірювальних тензоперетворювачів базується на зміні електричного опору чутливого елемента (наприклад, стрічки з тензочутливого матеріалу) при його деформації. Звичайно вони використовуються як перетворювачі, що передають, для виміру деформацій елементів конструкцій або чутливих елементів первинних приладів. Так, тензоперетворювачі можуть бути використані для дистанційного виміру тиску, якщо їх механічно з'єднати з манометрами, що деформуються під дією тиску.

Основними вимогами до тензочутливих матеріалів є стабільність характеристик, малий температурний коефіцієнт електричного опору, висока чутливість. Дуже часто як матеріали використовуються константан, сплави міді і нікелю, нікелю і хромуму і т.д.

Поряд із металевими тензоперетворювачами застосовуються і напівпровідникові. Останні мають більш високу тензочутливість, в порівнянні з металевими, малі розміри і масу.

За будовою металеві тензоперетворювачі підрозділяються на ті, що наклеюються, і ті, що не наклеюються. Найбільш поширеними є тензорезистори, що наклеюються, які виконуються з зигзагоподібно покладеного і приклеєного на підкладку 1 (із паперу або пластмаси) дроту 2 діаметром 0,01-0,05 мм (рис. 2.49). До кінців дроту приварені вивідні провідники 3 діаметром 0,5 мм. Фольговий тензоперетворювач виготовляється з металеві фольги товщиною 0,001- 0,01 мм.

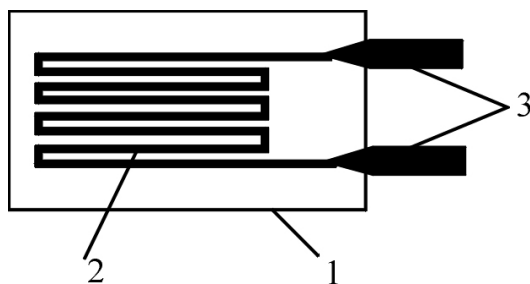


Рис. 2.49 – Металевий тензоперетворювач

Тензоперетворювач наклеюється на елемент, що деформується, за деформації якого змінюються розміри й електричний опір дроту, причому ця зміна залежить від ступеня деформації. Зміна опору звичайно вимірюється за допомогою мостової схеми. Відносна зміна опору тензоперетворювачів невелика (наприклад, для металевих вона не перевищує 1%), тому температурний коефіцієнт матеріалу дроту повинен бути близьким до нуля. Крім того, для зменшення впливу температури застосовуються спеціальні схеми термокомпенсації.

Промислові тензорезистивні перетворювачі призначені для перетворення тиску до 100 МПа, розрідження і різниці тисків до 16 МПа в пропорційне значення вихідного сигналу постійного струму.

**Іонізаційні манометри.** Для виміру тиску в діапазоні  $10^{-1} - 10^{-8}$  Па використовуються іонізаційні манометри. Схема приладу надана на рис. 2.50. Основним елементом манометра є скляна манометрична лампа, що містить катод 1, що



знаходиться всередині анодної сітки 2, оточеної циліндричним іонним колектором 3. Електрони, які ежектуються розпеченим катодом, прискорюються позитивною напругою, прикладеною між анодом і катодом. При русі електрони іонізують молекули розрідженого газу. Позитивні іони потрапляють на негативно заряджений колектор 3. За сталості анодної напруги й електронної емісії розмір колекторного струму  $I_k$  залежить від тиску, що вимірюється.

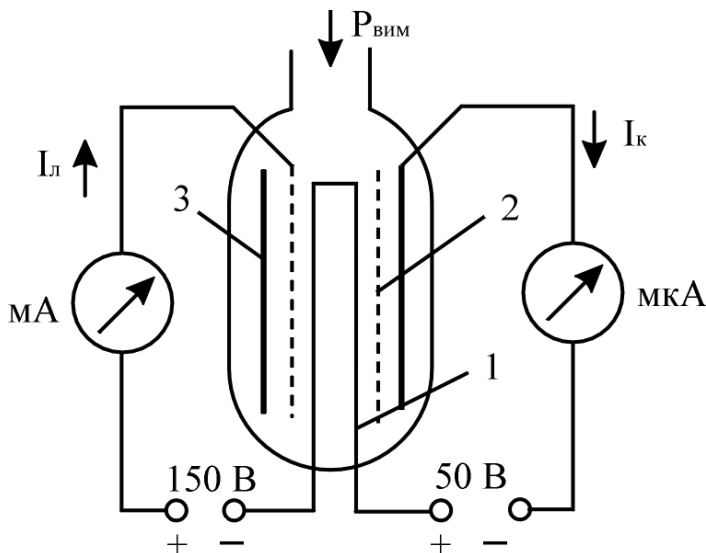


Рис. 2.50 – Схема іонізаційного манометра

Нижня межа виміру іонізаційних манометрів обмежена фоновим струмом, викликаним м'яким рентгенівським випромінюванням анода та фотоелектронною емісією колектора.

В магнітних електророзрядних манометрах із холодним катодом для зниження нижньої межі виміру до  $10^{-10}$  Па траєкторія прямивання електронів у лампі формується за рахунок використання зовнішнього магнітного поля, при цьому подовжується пробіг електронів, зростає число їх співударів із молекулами газу.

Теплові манометри. Для виміру тиску в діапазоні  $1-10^4$  Па ( $10^{-2}-10^2$  мм рт. ст.) використовуються теплові манометри, які, як і іонізаційні, містять у собі манометричний перетворювач і вимірювальний блок. Принципова вимірювальна схема теплового манометра наведена на рис. 2.51. Вона являє собою неврівноважений міст, на який напруга подається від стабілізованого джерела живлення ДЖ. Три плеча моста містять постійні резистори  $R_1 - R_3$ , а четверте являє собою нагріту до  $200\text{ }^\circ\text{C}$  вольфрамову нитку, яка знаходиться в камері, куди подається тиск, що вимірюється. За зазначених тисків унаслідок зниження числа молекул довжина їх вільного пробігу стає сумірною з відстанями між теплопередаючими поверхнями вимірювальних камер приладу, у зв'язку з чим теплопровідність за тисків  $10^3$  Па (10 мм рт. ст.) і нижче лінійно зменшується за мірою зниження тиску.

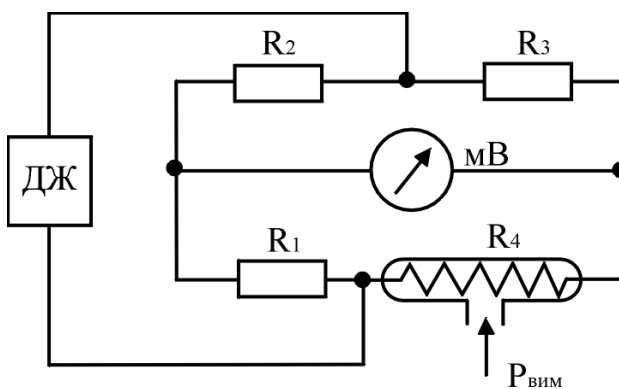


Рис. 2.51 – Схема теплового манометра

Тепловіддача від вольфрамової нитки залежить як від числа молекул, що беруть участь у переносі тепла, так і від температури стінок камери. Для зниження впливу на показання приладу коливань температури навколишнього середовища, що визначає температуру стінок камери, плече моста, що притискується до  $R_4$ , поміщається до вакуумованої камери, аналогічної вимірювальній.

Нижня межа застосування манометрів обмежується зростанням за мірою зниження теплопровідності ролі променистого теплообміну, що стає визначальним за тисків нижче  $10^{-1}$  Па ( $10^3$  мм рт. ст.).

Для виміру температури нитки можуть використовуватися термопари, у цьому випадку теплові манометри називають термопарними. Схема манометричного перетворювача (лампи) вакуумметра типу ВТ-2 подана на рис. 2.52. У середині скляного балона 1, який вакуумно щільно під'єднують верхньою частиною до об'єкта виміру тиску, знаходиться платиновий нагрівач 2, температура якого вимірюється хромель-копелевою термопарою 3.

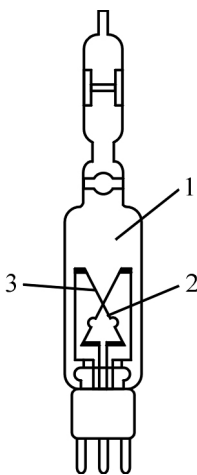


Рис. 2.52 – Термопарний манометричний перетворювач

Теплові манометри можуть працювати в режимі підтримки постійного струму через нагрівач, тоді тиск, що вимірюється, пропорційний різниці між температурами нагрівача і стінок лампи. При роботі в режимі підтримки постійної різниці температур за рахунок зміни струму розмір останнього характеризує тиск, що вимірюється.

## 2.3 Датчики для контролю рівня речовин

Вимірювання рівня рідини відіграє важливу роль при автоматизації технологічних процесів у багатьох галузях промисловості. Ці виміри особливо важливі в таких випадках, коли підтримання деякого заданого рівня рідин, пов'язано з умовами безпечної роботи обладнання. На сьогодні існує велике число методів виміру рівня рідин. Вимір рівня відбувається як у відкритих ринках, так і в ємностях, що знаходяться під тиском.

Технічні засоби, які призначені для виміру рівня рідини, називають рівнемірами.

За принципом дії рівнеміри підрозділяються на гідростатичні, поплавкові, ємнісні, радіоізотопні й інші, що одержали незначне поширення.

Одним із найбільш поширених методів є вимір гідростатичного тиску стовпа рідини манометричними або пневмометричними пристроями. У цих методах, як правило, головною є похибка за рахунок зміни щільності рідини, що вимірюється, від температур. Для виключення або зменшення цієї похибки створюються складні вимірювальні системи, що одночасно вимірюють гідростатичний тиск рідини та її щільність і коригуючі потім показання рівнеміра відповідно до щільності. Природно, це ускладнення вимірювальної системи зменшує її надійність.

Всі системи виміру рівня рідин гідростатичним методом потребують ретельного аналізу вимірювальної системи, сполучних ліній, їхнього температурного режиму, особливостей роботи вимірювальних перетворювачів. Наприклад, для однієї й тієї ж системи виміру рівня в барабані котла застосування мембранних дифманометрів замість поплавкових істотно зменшує можливі похибки виміру рівня.

Рівнеміри, які застосовуються для виміру рівня рідини з метою підтримки його постійним у певних межах, komponують пристроєм для сигналізації граничних відхилень рівня від заданого значення.

Для виміру рівня рідини застосовують поплавкові, буйкові, гідростатичні, ультразвукові й акустичні прилади, для виміру рівня рідини і твердих сипучих матеріалів – ємнісні і радіоізотопні.

Крім того, знаючи площу будь-якої ємності, за величиною рівня можна визначити кількість речовини в ній. Часто за умовами технологічного процесу немає необхідності у вимірі рівня по усій висоті апарату. У таких випадках застосовують узкомежні, але більш точні рівнеміри. Особливу групу складають рівнеміри, які використовуються тільки для сигналізації граничних значень рівня.

Як рівнеміри використовують серійні дифманометри – поплавкові, мембранні і сільфонні (див. розділ «Вимір тиску»). У ряді технологічних процесів можливе використання пневмометричних рівнемірів, у яких гідростатичний тиск стовпа рідини врівноважується тиском повітря (інертного газу). Як вимірювальний перетворювач, як правило, використовуються дифманометри, а при зміні у відкритих ринках можуть бути використані напірометри і манометри.

Рівнеміри з візуальним відліком. Найпростішими приладами для виміру тиску є рівнеміри з візуальним відліком. Такі рівнеміри базуються на візуальному вимірі висоти рівня рідини. За невисоких тисків середовища висота рівня вимірюється у скляній трубці (вказівному склі), яка сполучається з рідинним і газовим просторами контрольованого резервуара (рис. 2.53). За підвищених тисків застосовуються плоскі стекла, на поверхні яких із боку рідини нанесені вертикальні грановані канавки. З умов міцності не рекомендується застосовувати вказівні стекла довжиною більше 0,5 м, тому при великому діапазоні зміни рівня встановлюється декілька стекол у шаховому порядку таким чином, щоб їхні діапазони виміру перетиналися.

Основним джерелом додаткової похибки таких рівнемірів є різниця щільностей рідини в контрольованому резервуарі та у склі, що викликається розходженням температур (особливо якщо рідина в резервуарі знаходиться за високої температури, а вказівне скло знаходиться на значному віддаленні). Розходження

щільностей призводить до розходження рівнів у резервуарі і вказівному склі (рівень у склі іноді називають «ваговим» рівнем).

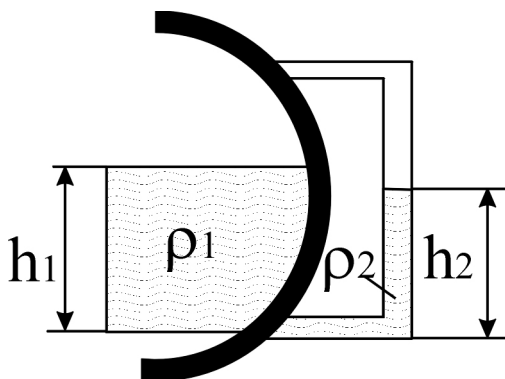


Рис. 2.53 – Схема рівнеміра з візуальним відліком

Похибка може досягати істотних значень, тому з метою її зменшення необхідна або теплова ізоляція рівнеміра, або продування його рідиною з резервуара перед відліком.

Поплавкові рівнеміри. У поплавкових рівнемірах є плаваючий на поверхні рідини поплавець, у результаті чого рівень, який вимірюється, перетворюється на переміщення поплавця. У таких приладах використовується легкий поплавець, виготовлений із корозійностійкого матеріалу.

Поплавкові рівнеміри є одними з найбільш простих і надійних. Проте вони практично не можуть застосовуватися за високих тисків. Вони дозволяють контролювати рівень рідин у широкому діапазоні від 50 до 2000 мм. До таких сигналізаторів граничних значень контрольованих рівнів відносяться поплашкові прилади типів РРС (реле рівня сильфонне), СУ (сигналізатор рівня), ДРР (дистанційне реле рівня).

На рис. 2.54 показано загальний вид приладу ДРУ-1. Поплавець 3 (порожниста металева куля), сполучений початком 2

із мікрорелем 1, знаходиться в контрольованій рідині. При досягненні максимального рівня на кулю 3 діє гранична уштовхуюча сила, що змушує шток 2 підніматися і переключати мікрореле, який сигналізує про аварійний рівень.

Індикуючий пристрій сполучено з поплавцем тросом або за допомогою важелів. Поплавковими рівнемірами можна вимірювати рівень рідини у відкритих ємностях.

Основними несправностями у таких приладах є порушення герметичності кулі, корозія контактів перемикача внаслідок підвищеної вологості контрольованого середовища.

За необхідності поверхня кулі в місцях ушкодження підлягає паянню припоєм ПОС-40 або ПОС-60 за допомогою газового пальника або паяльника. Мікроперемикач залежно від ступеня корозії підлягає ремонту або заміні на новий тип МП.

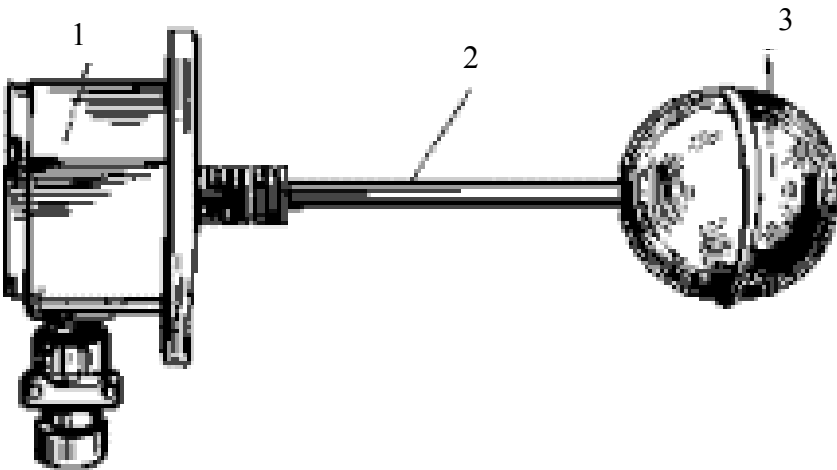


Рис. 2.54 – Датчик-реле рівня типу ДРУ-1:

1 – корпус датчика з мікрорелем; 2 – шток; 3 – поплавець

**Буйкові рівнеміри.** У буйкових рівнемірах (рис. 2.55) застосовується нерухомий занурений у рідину буй 3. Принцип дії

буйкових рівнемірів базується на тому, що на занурений буй діє з боку рідини виштовхуюча сила  $F$ . За законом Архімеда ця сила дорівнює вазі рідини, витиснутої буйком. Але, як очевидно з рис. 2.55, кількість витиснутої рідини залежить від глибини занурення буя, тобто від рівня в ємності  $H$ . Таким чином, у буйкових рівнемірах рівень  $H$ , який вимірюється, перетворюється на пропорційну йому виштовхуючу силу. Тому залежність виштовхуючої сили від рівня, який вимірюється, лінійна.

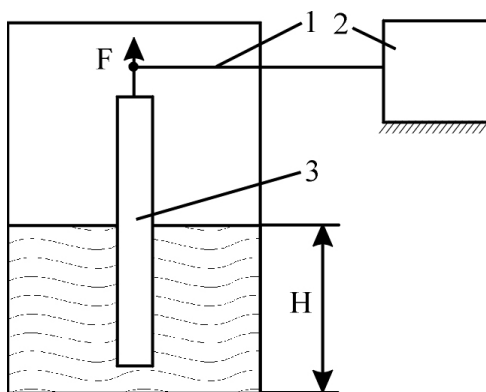


Рис. 2.55 – Буйковий рівнемір:

1 – важіль; 2 – проміжний перетворювач сили в уніфікований сигнал; 3 – буй

У буйкових рівнемірах УБ-П і УБ-Э буй передає зусилля на важіль 1 проміжного перетворювача 2. Вихідний сигнал першого рівнеміра – уніфікований пневматичний, іншого – уніфікований електричний сигнал (постійний струм).

Принцип дії буйкових рівнемірів дозволяє в широких межах змінювати їх діапазон виміру. Це досягається як заміною буя, так і зміною передатного підіймаючого механізму проміжного перетворювача. Рівнеміри УБ можуть вимірювати рівень у межах від 0-40 мм до 0-16 м.



Застосування буйкових, а так само і поплавкових рівнемірів ускладнено в агресивних рідинах і середовищах з осадами, що випадають. Для дистанційного виміру рівня рідини застосовуються буйкові рівнеміри з уніфікованим електричним або пневматичним сигналом типів УБ-Э й УБ-П. Вимірювальні схеми рівнемірів побудовані за принципом компенсації зусиль.

Прилад УБ-П має пневматичний **вихідний сигнал**, що **дозволяє підключати до нього манометричний реєструючий прилад (для відліку показань рівня)**.

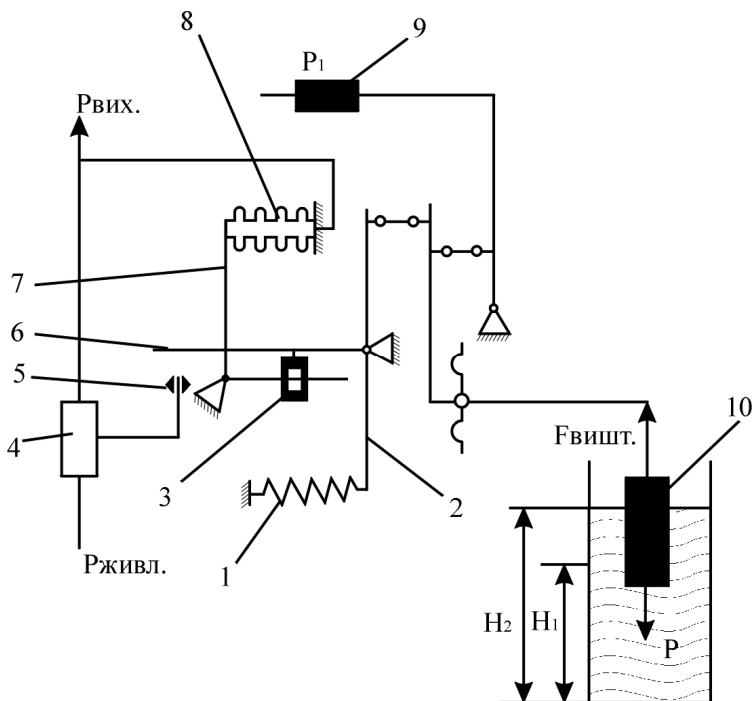


Рис. 2.56 – Схема роботи рівнеміра УБ-П:

- 1 – пружина коректора; 2 – Т-подібний важіль; 3 – рухлива опора;
- 4 – пневмореле; 5 – сопло; 6 – заслінка; 7 – Г-подібний важіль;
- 8 – сифлон зворотного зв'язку; 9 – вантаж-противага; 10 – датчик-буй

Самостійно як вимірювач рівня рівнемір УБ-П не застосовується, а використовується як датчик. На рис. 2.56 наведено принцип дії даного рівнеміра. Буй 10, занурений у рідину, через систему важелів урівноважений у визначеному положенні протидіючим вантажем  $P_1$ . При зміні рівня рідини змінюється сила, яка виштовхує поплавець. Внаслідок цього порушується рівновага вимірювальної системи "вантаж – противага" і на чутливому елементі зміна рівня перетворюється в пропорційне зусилля, що врівноважується зусиллям сільфона зворотного зв'язку 8. Цей тиск і є пневматичним вихідним сигналом рівнеміра, який змінюється в межах 0,02-0,1 МПа.

**Гідростатичні рівнеміри.** Гідростатичний метод виміру рівня базується на тому, що в рідині існує гідростатичний тиск, пропорційний глибині, тобто відстані від поверхні рідини. Тому для виміру рівня гідростатичним методом можуть бути використані прилади для виміру тиску або перепаду тисків. Як такі прилади звичайно застосовують дифманометри.

При вмиканні дифманометра 1 за схемою, показаною на рис. 2.57, а, перепад тисків на ньому буде дорівнювати гідростатичному тиску рідини, що пропорційно рівню  $H$ , який вимірюється.

Якщо рідина в ємності знаходиться під надлишковим тиском, то дифманометр 1 включають за схемою, приведеною на рис. 2.57, б, причому його плюсову камеру з'єднують із простором над рідиною через порівнювальну посудину 2. Цю посудину заповнюють рідиною, стовп якої створює постійний гідростатичний тиск у плюсовій камері дифманометра.

Оскільки вимірюється перепад тисків, рівний різниці гідростатичних тисків рідини в камерах дифманометра, вимірюваний рівень буде пропорційний різниці між рівнем у розділювальній судині  $H_{\max}$  і рівнем, який вимірюється  $H$ . Оскільки рівень у розділювальній судині постійний і відомий, то його завжди можна врахувати в показаннях приладу.

При вимірі рівня агресивних рідин дифманометр захищається розділювальними посудинами або мембранними роздільниками, що дозволяє заповнити його камери і трубки неагресивною рідиною.

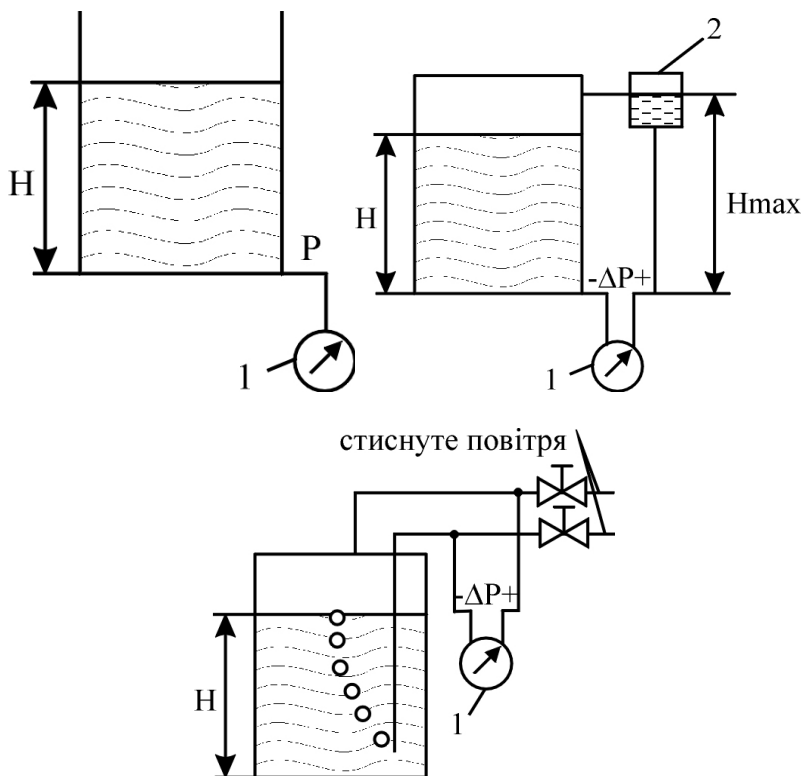


Рис. 2.57 – Вимір рівня дифманометрами:

а – у відкритій ємності; б – у ємності під тиском; в – для суспензій і шламів; 1 – дифманометр; 2 – зрівняльна судина

При вимірі рівня суспензій і шламів осадки можуть забивати імпульсні трубки дифманометрів, їх безупинно продувають стиснутим повітрям. У цьому випадку дифманометр 1 включають за схемою, приведеною на рис. 2.57, в. Імпульсні трубки увесь час заповнені повітрям для продувтя. За невеликої витрати повітря його тиск у мінусовій камері стає рівним тиску над рідиною в ємності, а в плюсовій – тиску в рідині. Тому перепад тисків у дифманометрі буде дорівнювати гідростатичному тиску рідини і, отже, буде пропорційний рівню, що вимірюється.

**Ємнісні рівнеміри.** Ємнісні рівнеміри використовують для виміру рівня зміни ємності вимірювального перетворювача, викликаного зміною рівня рідини. Рівнеміри такого типу можуть застосовуватися для виміру як неелектропровідних, так і електропровідних рідин. Вони придатні для виміру рівня в широкому діапазоні тисків і температур агресивних і неагресивних середовищ. Їх показання залежать від діелектричної проникності середовища, яка може змінюватися з температурою. Застосування компенсаційних ємностей дозволяє істотно зменшити цей вплив, але не виключає його цілком. Електронна схема ємнісних рівнемірів достатньо складна, що обмежує їх широке поширення.

Найпростіший первинний перетворювач ємнісного приладу являє собою електрод 1 (металевий стрижень або провід), розташований у вертикальній металевій трубці 2 (рис. 2.58, а). Стрижень разом із трубою утворюють конденсатор. Ємність такого конденсатора залежить від рівня рідини, тому що при його зміні від нуля до максимуму діелектрична проникність буде змінюватися від діелектричної проникності повітря до діелектричної проникності рідини.

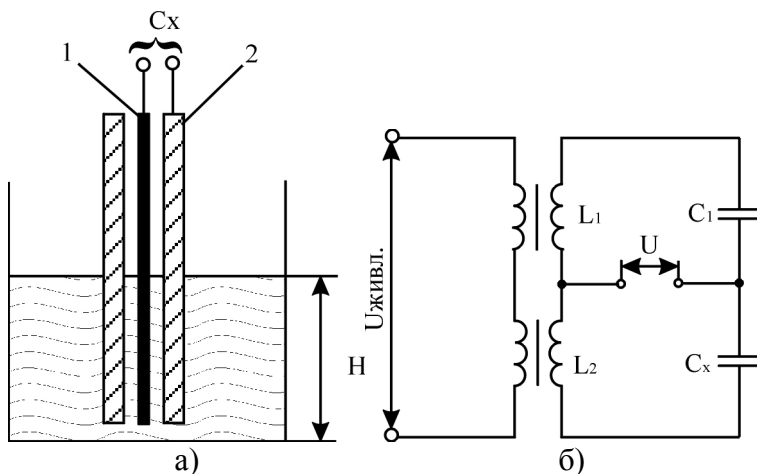


Рис. 2.58 – Ємнісний рівнемір:

а – будова датчика; б – електрична схема рівнеміра

Електрична схема ємнісного рівнеміра приведена на рис. 2.58, б. Вимір електричної ємності первинного перетворювача  $C_x$  виконується незрівноваженим мостом перемінного струму, плечами якого є індуктивності  $L_1$  і  $L_2$  і ємність первинного перетворювача  $C_x$ . При зміні рівня змінюється ємність  $C_x$ , що призводить до зміни вихідної напруги моста  $V$ .

Ємнісні рівнеміри можуть вимірювати рівень не тільки рідин, але і твердих сипучих матеріалів: цементу, вапна і т.п.

Для підвищення чутливості ємнісних сигналізаторів рівня електроди встановлюють у горизонтальному положенні. У цьому випадку похибка виміру не перевищує 3 мм.

Одним із прикладів складної системи, яка дозволяє контролювати не тільки рівень, але й інші параметри (кількість, щільність, температуру), є система «Резервуар-2» (рис. 2.59).

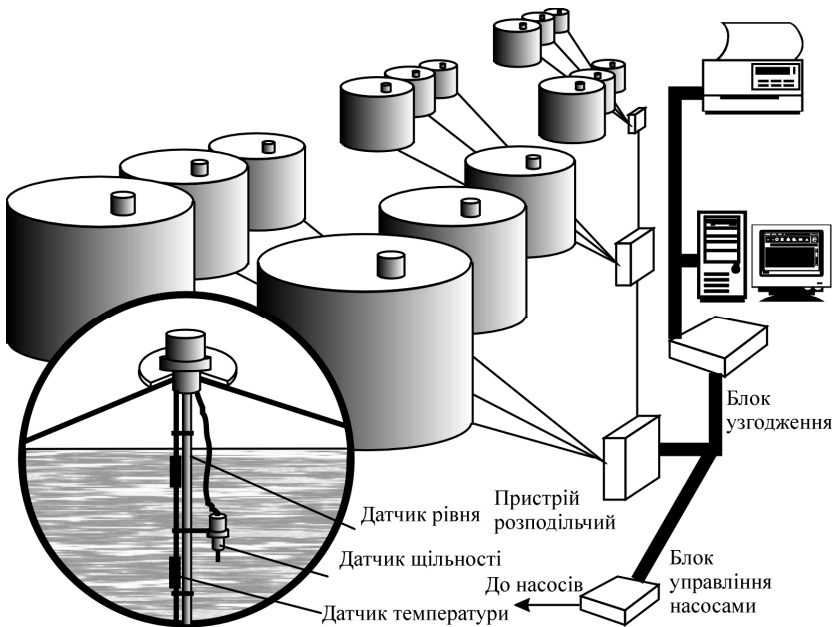


Рис. 2.59 – Схема системи контролю рівня «Резервуар-2»

Використання цієї системи дозволяє контролювати ситуацію в ємностях не тільки на місці (оператором), але і передавати її на необмежені відстані, використовуючи GSM-стандарт.

**Радіоізотопні рівнеміри.** Такі рівнеміри застосовують для виміру рівня рідин і сипучих матеріалів у закритих ємностях. Їх дія базується на поглинанні  $\gamma$ -променів при проходженні через прошарок речовини.

Радіоізотопні рівнеміри встановлюються поза апаратом або установкою. Вони не мають безпосереднього контакту з середовищем, параметри якого вимірюються, і це є їх принциповою перевагою в порівнянні з іншими методами.

У радіоізотопному рівнемірі (рис. 2.60) джерело 2 і приймач 10 випромінювання підвішені на сталевих стрічках 3, на яких вони можуть переміщатися у трубах 11 по усій висоті бака 1. Стрічки намотані на барабан 5, що приводиться у рух реверсивним електродвигуном 7.

Якщо вимірювальна система (джерело і приймач  $\gamma$ -променів) розташована вище рівня середовища, поглинання випромінювання слабке і від приймача 10 по кабелю 9 на блок керування 8 буде приходити сильний сигнал. За цим сигналом електродвигун 7 одержить команду на спуск вимірювальної системи. При зниженні її нижче рівня середовища поглинання  $\gamma$ -променів різко збільшиться, сигнал на виході приймача зменшиться й електродвигун почне піднімати вимірювальну систему.

Таким чином, положення вимірювальної системи буде відслідковувати рівень у ємності (точніше вона буде знаходитися в безупинному коливанні коло рівня, що вимірюється). Це положення у вигляді кута повороту ролика 4 перетворюється вимірювальним пристроєм 6 на уніфікований сигнал – напругу постійного струму  $U$ .

Радіоізотопні рівнеміри типу УР-8 можуть вимірювати рівень у ємностях висотою до 10 м.

Аналогічний принцип використаний у радіоізотопному сигналізаторі рівня ГР-8, джерело і приймач випромінювання якого закріплюють зовні ємності на необхідній висоті. При

досягненні середовищем цього рівня включається сигнальний пристрій.

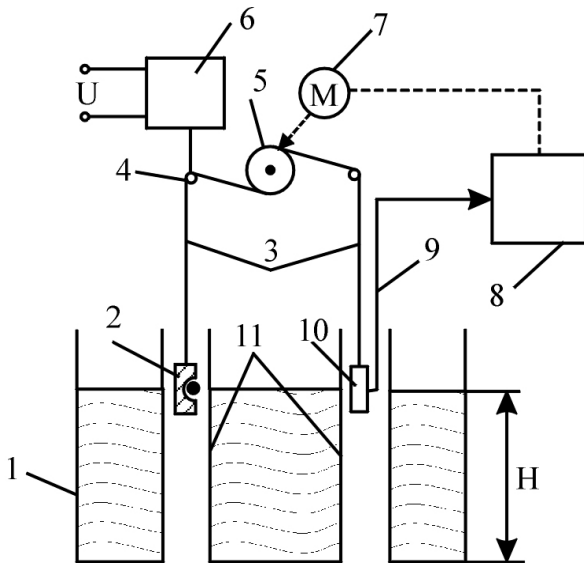


Рис. 2.60 – Радіоізотопний рівнемір:

1 – бак; 2 – джерело випромінювання; 3 – сталеві стрічки; 4 – ролик; 5 – барабан; 6 – вимірювальний пристрій; 7 – реверсивний електродвигун; 8 – блок керування; 9 – кабель; 10 – приймач випромінювання; 11 – труби

Електричні реле рівня типу РУ-ЭЗ (рис 2.61, а) дозволяють контролювати одночасно три рівні середовища – нижній, середній і верхній. На платі 1 монтуються всі три датчики рівня; відстань між рівнями вибирається залежно від місцевих умов. Блок 2 являє собою електричну схему реле.

Електрична схема приладу (рис 2.61, б) включає трансформатор Тр1, випрямляч Д1-Д4, реле сигналізації Р1 і затискачі для підключення датчиків. Датчики – сталеві стрижні з нержавіючої сталі Х18Н9Т – підключаються на затискачі 8, 9, 10 (відповідно нижній, середній і верхній).

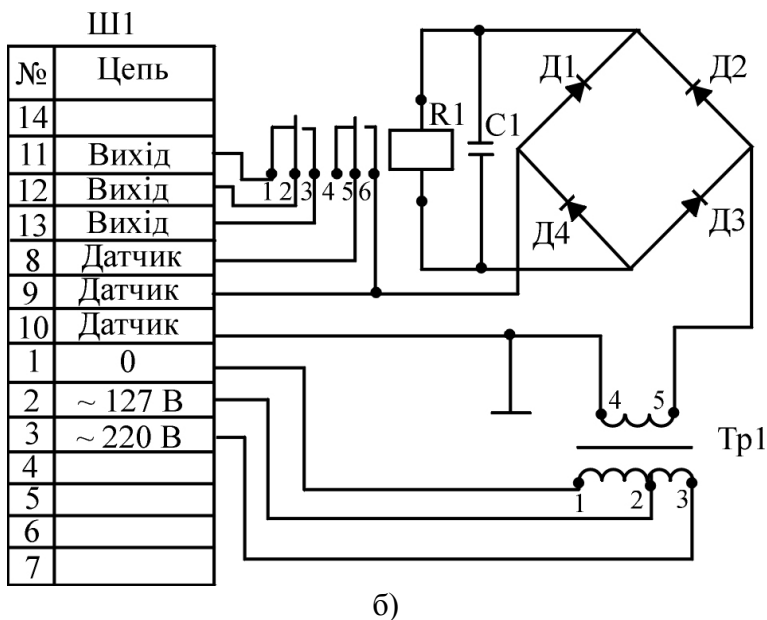
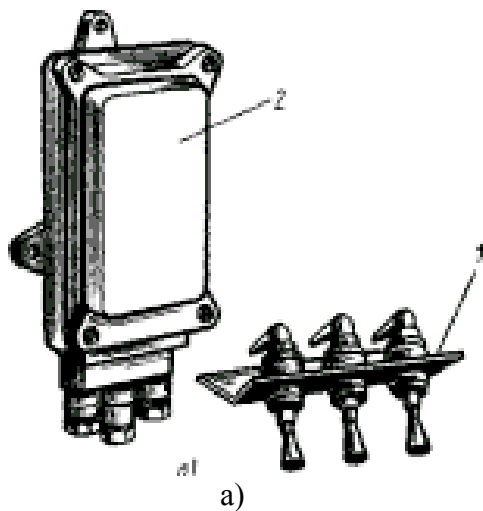


Рис. 2.61 – Реле рівня РУ-ЭЗ:

а) загальний вигляд: 1 – плата, 2 – блок; б) електронна схема



2.2.1	Поняття тиск, одиниці виміру тиску .....	137
2.2.2	Прилади вимірювання тиску .....	138
2.2	Принципи вимірювання тиску, прилади для вимірювання тиску .....	137
2.2.1	Поняття тиск, одиниці виміру тиску .....	137
2.2.2	Прилади вимірювання тиску .....	138
	Вантажопоршневі манометри. У вантажопоршневих манометрах тиск, що вимірюється, врівноважується силою ваги неуціленого поршня з вантажами. Манометри використовуються як зразкові засоби відтворення одиниці тиску в діапазоні від 10 <sup>-1</sup> до 10 <sup>13</sup> Па, а також для точних вимірів тиску в лабораторній практиці.....	155
2.3	Датчики для контролю рівня речовин .....	164