



Є. В. ЯЩЕРЦІН

ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ШКІДЛИВИХ ТА НЕБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБНИЧИХ ФАКТОРІВ



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

Ящеріцин Є. В.

Прилади контролю шкідливих та небезпечних виробничих факторів

Текст лекцій

для студентів за напрямом 263 — Цивільна безпека

Рекомендовано
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 25.06.2020 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2021

УДК 613.6: 621

Я97

Рецензенти:

Сучков Г.М. д-р техн. наук, проф., завідувач кафедри «Компютерні і радіоелектронні системи контролю та діагностики» НТУ «ХПІ».

Стоєв П.І. д-р фіз.-мат. наук, проф., провідний науковий співробітник ННЦ «Харківський фізико-технічний інститут».

Ящерицин Є. В.

Я 97 Текст лекцій з дисципліни «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів» для студентів за напрямом підготовки 263 «Цивільна безпека» / Є.В. Ящерицин. — Харків: ТОВ «Планета-Прінт», 2021. — 360 с.

ISBN 978-617-7897-25-4

У тексті лекцій розглянуті основні питання з програми дисципліни «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів», наведені теоретичні пояснення фізичних законів та явищ, на яких засновано принцип дії та порівняльні характеристики приладів, що призначені для вимірювання фізичних та хімічних шкідливих і небезпечних виробничих факторів.

Призначено для студентів, які навчаються за напрямом «Цивільна безпека» та іншими суміжними напрямками.

Іл. 168. Табл. 32. Бібл. 230.

УДК 613.6: 621

ISBN 978-617-7897-25-4

© Ящерицин Є. В., 2021

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	6
ТЕМА 1. Система контролю температури	8
Лекція 1. Історія розвитку методів контролю температури.....	8
Лекція 2. Контроль температури виробничих процесів за допомогою термопар	21
Лекція 3. Контроль температури виробничих процесів за допомогою рідинно-скляних термометрів	49
Лекція 4. Контроль температури виробничих процесів за допомогою пірометрів та тепловізорів	63
Лекція 5. Контроль температури виробничих процесів за допомогою температурних індикаторів, манометричних термометрів та термоперетворювачів опору.....	75
ТЕМА 2. Методи та прилади для визначення шкідливих газів та парів у повітрі	98
Лекція 6. Методи та прилади для визначення шкідливих газів та парів у повітрі	98
ТЕМА 3. Методи та прилади для визначення концентрації виробничого пилу у повітрі	132
Лекція 7. Методи та прилади для визначення концентрації виробничого пилу у повітрі	132
ТЕМА 4. Методи та прилади для визначення швидкості руху повітря	140
Лекція 8. Методи та прилади для визначення швидкості руху повітря.	140
ТЕМА 5. Методи та прилади для вимірювання вологості повітря	151
Лекція 9. Методи та прилади для вимірювання вологості повітря	151
ТЕМА 6. Системи контролю тиску при експлуатації обладнання з вакуумом та підвищеним тиском у робочому просторі	168
Лекція 10. Системи контролю тиску при експлуатації обладнання з вакуумом та підвищеним тиском у робочому просторі.....	168
ТЕМА 7. Система контролю виробничого шуму, ультра- та інфразвуку	203

Лекція 11.	Система контролю виробничого шуму, ультра- та інфразвуку.	203
ТЕМА 8.	Система контролю виробничої вібрації	229
Лекція 12.	Система контролю виробничої вібрації.	229
ТЕМА 9.	Системи контролю видимого світла, ультрафіолетового, інфрачервоного та лазерного випромінення	248
Лекція 13.	Системи контролю видимого світла, ультрафіолетового, інфрачервоного та лазерного випромінення	248
ТЕМА 10.	Вимірювання параметрів електромагнітних полів та електричного струму	264
Лекція 14.	Вимірювання параметрів електромагнітних полів та електричного струму	264
ДОДАТКИ		313
ДОДАТОК 1.	Термопары для вимірювання високих температур	313
ДОДАТОК 2.	Термопары для вимірювання низьких температур	315
ДОДАТОК 3.	Сучасні тепловізори	316
ДОДАТОК 4.	Термохімічні індикаторні олівці.	317
ДОДАТОК 5.	Термохімічні індикаторні порошки	317
ДОДАТОК 6.	Сучасні газоаналізатори	318
ДОДАТОК 7.	Сучасні хромато- мас-спектрометри	320
ДОДАТОК 8.	Сучасні аналізатори пилу.	321
ДОДАТОК 9.	Порівняльні характеристики анемометрів	322
ДОДАТОК 10.	Характеристики приладів для вимірювання вологості.	324
ДОДАТОК 11.	Точність вимірювань низького тиску залежно від діапазонів.	325
ДОДАТОК 12.	Рідини, що використовують для вимірювання надлишкових тисків.	326
ДОДАТОК 13.	Рідини, що використовують для вимірювання низьких абсолютних тисків	327
ДОДАТОК 14.	Основні характеристики деформаційних манометрів	328
ДОДАТОК 15.	Характеристики барометрів-анероїдів.	329
ДОДАТОК 16.	Характеристики датчиків для вимірювання низьких абсолютних тисків	329
ДОДАТОК 17.	Прилади для вимірювання шуму, відомі з кінця ХХ ст.	330
ДОДАТОК 18.	Характеристики сучасних приладів для вимірювання виробничого шуму, інфра- та ультразвуку.	331

ДОДАТОК 19.	Характеристики сучасних приладів для вимірювання вібрації..	333
ДОДАТОК 20.	Характеристики приладів для вимірювання рівнів яскравості робочих поверхонь.	334
ДОДАТОК 21.	Характеристики приладів для вимірювання ультрафіолетового випромінювання..	335
ДОДАТОК 22.	Характеристики приладів для вимірювання інфрачервоного випромінювання.	336
ДОДАТОК 23.	Характеристики приладів для вимірювання рівнів імпульсного та безперервного лазерного випромінювання.	337
ДОДАТОК 24.	Характеристики приладів для вимірювання потужності лазерного випромінювання	338
ДОДАТОК 25.	Величини, що характеризують електромагнітне поле . .	338
ДОДАТОК 26.	Прилади для вимірювання щільності потоку електромагнітного випромінювання	339
ДОДАТОК 27.	Прилади для вимірювання напруженості електричних та магнітних полів.	340
ДОДАТОК 28.	Характеристики деяких аналогових амперметрів	341
ДОДАТОК 29.	Характеристики електронних вольтметрів.	342
ДОДАТОК 30.	Порівняльні характеристики аналогових та електронних мегаомметрів.	343
ДОДАТОК 31.	Порівняльні характеристики аналогових мостів виробництва радіоелектронної промисловості колишнього СРСР.	344
ДОДАТОК 32.	Порівняльні характеристики сучасних RLC-метрів (вимірювачів опорів, індуктивностей та ємностей.	345
ДОДАТОК 33.	Порівняльні характеристики вимірювачів опору заземлення	346
ДОДАТОК 34.	Порівняльні характеристики електродинамічних, конденсаторних та електронно-лічильних частотомірів	347
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.		350

ПЕРЕДМОВА

Ще у другій половині ХХ-го століття у сфері фахівців, які професійно займались охороною праці на виробництві, виникло розуміння того, що підготовку спеціалістів для відділів «Охорона праці» слід робити системно у вищих навчальних закладах. Проте реалізувати цю ідею на теренах України вдалось лише після здобуття незалежності. У НТУ «ХПІ» підготовка фахівців за напрямком 6.170202 «Охорона праці» (з 2016 р. 263 «Цивільна безпека») ведеться з 2013 р. на кафедрі «Безпека праці та навколишнього середовища». Відразу виникла необхідність у розробці навчально-методичної літератури за багатьма навчальними дисциплінами, однією з яких була «Системи контролю небезпечних та шкідливих виробничих факторів».

При написанні цієї книги автор вважав, що майбутній фахівець у галузі охорони праці повинен добре орієнтуватись у приладах, якими вимірюють шкідливі та небезпечні фактори на виробництві, і, відповідно, фахово їх використовувати. При цьому слід зазначити, що оцінка впливу параметрів оточуючого людину середовища на умови та результати життя і праці людини являє собою предмет безперервних досліджень. Результати їх відображаються у нормативних документах (ДСТУ, ДБН, НПАОП, ДСанПіН та ін.), де визначають допустимі значення тих чи інших параметрів виробничого середовища.

Ефективність подібного нормування є очевидною. Проте відомо й те, що шляхи подовження життя й підвищення продуктивності праці людини, які є закладеними у нормування умов праці, далеко невичерпані.

При цьому основний напрямок в оптимізації оточуючого людину виробничого середовища ще чекає рішення — це комплексне нормування його параметрів, бо діючи на людину фактори взаємопов'язані та взаємообумовлені. Так, є загальновідомим факт посилення дії на людину електричного струму в умовах підвищеної температури повітря та вологості. Ступінь дії на людину токсичних речовин залежить у тому числі і від параметрів мікроклімату. Кількість подібних прикладів є необмежено великою.

Все це говорить про те, що комплексне нормування параметрів зовнішнього середовища є необхідним. Але труднощі такого нормування є дуже великими — це перед усім відсутність оптимальної фізичної моделі середовища, неможливість поки що дати комплексну приладну оцінку виробничого середовища.

Нарешті, важливим є також те, що не тільки у вітчизняній технічній літературі, але і навчально-методичній відсутні узагальнюючі праці, які б допомогли скласти уяву про те, яким чином відбувається вимірювання та з якою точністю визначається весь комплекс параметрів виробничого середовища. Інформація про це, на жаль, є розпорошеною по багатьох літературних джерелах.

У книзі не описані прилади, призначені для вимірювання іонізуючих випромінювань, бо відомості про них достатньо повно подані у навчально-методичній та спеціальній літературі, нарешті у курсах «Цивільний захист» та «Безпека праці у виробничій діяльності» тощо.

Автор висловлює подяку Ящериціній Т.В., яка надала велику допомогу в оформленні тексту лекцій, а також Ящерицину В.Є. та Ящериціній А.М. за фінансовий внесок, наданий для друку цієї книги.

Автор висловлює глибоку подяку рецензентам: д-ру техн. наук, проф. Сучкову Г.М. та д-ру фіз.-мат. наук, проф. Стоєву П.І. і буде вдячний усім, хто висловить зауваження і пропозиції щодо покращення змісту й методики викладення тексту лекцій.

ТЕМА 1. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ТЕМПЕРАТУРИ

Лекція 1.

Історія розвитку методів контролю температури

ПЛАН

- 1.1. Вступ. Основні поняття та задачі курсу. Історія розвитку вимірювання температури.
- 1.2. Визначення основних понять параметрів мікроклімату виробничих приміщень та їх нормування.

1.1. Вступ. Основні поняття та задачі курсу.

Історія розвитку вимірювання температури

«Системи контролю шкідливих та небезпечних виробничих факторів» — це дисципліна, яка вивчає методики і прилади контролю шкідливих та небезпечних виробничих факторів та окремі системи їх автоматичного контролю.

Мета дисципліни — забезпечити майбутніх інженерно-технічних фахівців знаннями і практичними навиками вимірювання та контролю шкідливих і небезпечних виробничих факторів.

Об'єктами вивчення є методики вимірювання та принципи роботи приладів, що вимірюють параметри шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

Предметом вивчення дисципліни є:

1. Фізичні закони та явища, які лежать в основі методик вимірювання шкідливих і небезпечних виробничих факторів.
2. Інженерно-конструкторське забезпечення контролю шкідливих і небезпечних виробничих факторів.
3. Системи автоматичного контролю шкідливих та небезпечних виробничих факторів.

Історія розвитку вимірювання температури.

Дотична доступність температури відома здавна [1]. До першого тисячоріччя до нашої ери належить поява понять про основні складові навколишнього світу, серед яких поряд із землею, водою і повітрям був вогонь, якому в багатьох зовнішніх проявах приписувались властивості, що узагальнюються

сучасним поняттям температури. Демокрит і Левкіп оперували поняттям елементарного вогню у загально-фізичних уявленнях, Гіппократ — стосовно медичних проблем. Однак, очевидно, не ними було введене поняття температури, тому що Аристотель під час обговорення чотириелементного світу посилається на «древніх» без згадування імен. Труднощі «древніх» у складанні чіткого уявлення про поняття температури пояснювались багатьма причинами, пов'язаними зокрема з відсутністю якої б то не було вимірювальної техніки, презирливим ставленням до експерименту заняттю «рабському», неприпустимому для філософів, і внутрішнім протиріччям інформації про теплові прояви у навколишньому світі. Температура є показником інтенсивності, тобто якісною характеристикою. Тому поняття температури у простих уявленнях змішується з поняттям кількості теплоти, що лежить в основі дотичних відчуттів. Теплоті властива **суперпозиція, температурі** — ні. Важко було зрозуміти, чому нагріті на вогні вода, олія чи смола при короткочасному дотику до них впливали помітно сильніше, ніж сам первопричинний вогонь. У середньовіччі багаторазово був описаний дослід, в якому пропонувалося одну руку витримати у теплій воді, а іншу — у холодній. Після цього змішана вода відчувається однією рукою як холодна, інша — як тепла. Приміщення глибокої печери, підвалу уявляється взимку теплим, а влітку — прохолодним. У зв'язку з великою параметричною чутливістю організму до теплового впливу головні поняття довго знаходились на суб'єктивній основі. Це перешкоджало побудові уявлень у чіткій, логічно замкнутій послідовності розумових заключень. Для порівняння можна навести вимір кута нахилу екліптики Ератосфеном: за 22 століття це значення уточнилося до дійсного часу тільки на шість кутових хвилин. У силу чисто фізіологічних причин, пов'язаних з терморегуляцією, теплокровні організми здатні дуже гостро реагувати на зміну теплового впливу навколишнього середовища з переходом від нагрівання до охолодження, і навпаки. При температурі, близькій до тілесної, організм здатний реагувати на зміни порядку 0,1 К. Задовго до появи перших інструментів для вимірювання температури з повсякденного досвіду були відомі головні її параметричні властивості, зокрема, прагнення теплоти до температурної рівноваги в результаті її переходу від гарячих тіл до холодних. Рівноважна температура чітко уявлялася нижче температури спочатку гарячого тіла і вище спочатку холодного. Подібні ідеї всюди сприймалися настільки однаково, що рівною мірою глибоко увійшли в усі відомі мови з найдавніших часів.

На основі почуттєвих сприйнятів навколишніх явищ природно прийшли до послідовності таких понять, як зима холодна, капання, літня

прохолода, червоне і біле розжарювання, температури, що відповідають здоровій нормі і пропасному (лихоманковому) стану тіла людини. На такій природній шкалі кожному тілу в його стані може бути знайдене цілком визначене місце між більш і менш нагрітими тілами, що дозволяє порівнювати відносну кількість енергії, що міститься у тілі, і здатність тіла сприймати чи віддавати енергію в якісному змісті, тобто незалежно від кількісних характеристик: розмірів, об'єму і маси тіла.

Потреба у вимірах температури з пізнавальною метою виникла лише у середині XVI ст. Щоб робити такі вимірювання, можна було скористатися будь-якою відомою зі спостережень залежністю якого-небудь параметра від температури. Ще Герону Олександрійському (I ст.) була відома властивість повітря розширюватися при нагріванні, чим він пояснював прагнення вогню угору. Зміна об'єму зі зміною температури при постійному тиску в газах, зокрема у повітрі, виражена більш сильно, ніж у рідких і твердих тілах. На цій основі у 1597 р. **Галілеєм** був запропонований для порівняльних температурних досліджень термоскоп, що складався зі скляного балончика, заповненого повітрям і з'єднаного тонкою трубкою із судиною, в якому знаходилася зафарбована рідина (вода чи спирт). Зміна температури повітря в балончику супроводжувалася зміною рівня зафарбованої рідини у трубці. Істотним недоліком цього першого з відомих термометрів була чутливість до зміни атмосферного тиску.

У 1631 р. французький лікар **Ре** описав термометр, дія якого була заснована на використанні властивості термічного розширення води. Конструкція термометра, подібного до поширених тепер рідинно-скляних, створена у 1654 р. Його появу пов'язують з ім'ям учня Галілея — герцога тосканського Фердинанда II. Термометр являв собою герметично запаяну судину з вертикальним указівним капіляром. Як робоча рідина використовувався винний спирт. Збереглися дані про те, що при снігопаді він показував 20°, а у самий спекотний день — 80° градусів. Розподіл градусів був нанесений емалевими крапельками прямо на трубку капіляра. Збереглася гравюра флорентійського термометра, в якому капіляр звитий у 12 витків по гвинтовій лінії, а розподіл шкали нанесений у вигляді вертикальних скляних брусочків, припаяних до капіляра і робить усю конструкцію досить міцною.

Метрологічну основу термометрії заклав падуанський лікар Санкторіо. Використовуючи термоскоп Галілея, він увів дві абсолютні точки і регламентував систему перевірки, відповідно до якої всі флорентійські термометри градувалися за зразковим санкторіансько-галілеєвським приладом.

Значення фіксованих крапок не збереглися. Відомо, що флорентійські термометри задовольняли основній метрологічній вимозі: в однакових умовах — однакові показання. Флорентійські термометри відразу ж знайшли широкого застосування у метеорологічних вимірах; з літописів можна установити, що точка танення льоду відповідала 13,5° флорентійської шкали.

На початку XVIIIст. зареєстрований ряд пропозицій, спрямованих на прив'язку термометричної шкали до декількох легко і надійно відтворюваних точок, що надалі одержали найменування **реперних**. У 1701р. Ньютон запропонував зв'язати шкалу з температурами танення льоду і тіла людини. Вибір останньої був обумовлений описом походження людини «по образу та подобою» у Біблії — самому офіційному документі того часу. У 1703р. французький академік Амонтон, ґрунтуючись на тому, що теплота являє собою одну з форм руху, доходить висновку, що нульова точка температурної шкали повинна відповідати стану, при якому припиниться будь-який рух часток. Він думав, що при цьому частки будуть займати найменший об'єм та у випадку газу робити найменший можливий тиск на обмежуючі його стінки. Амонтон вперше почав спробу визначити положення абсолютного нуля відносно точки танення льоду.

Значна роль у становленні температурних вимірювань належить **Фаренгейтові**. Він народився у 1686р. у Гданську (Данцизі), від зрілості і до смерті (1736р.) прожив у Голландії й Англії. Основним його заняттям було неогоціанство (оптова торгівля). Науковими дослідженнями він займався для задоволення цікавості. Поеднання дарування вченого з підприємницькими здібностями дозволило йому вперше налагодити серійне виробництво уніфікованих термометрів з відтвореними показаннями. Ним же була вперше застосована ртуть як робоча рідина (1714р.) і створена відтворена температурна шкала. У шкалі Фаренгейта як нуль була обрана температура суміші снігу з нашатирем, друга точка (за Ньютоном) відповідала температурі тіла здорової людини, а проміжок був розділений на 12°. При цьому були зафіксовані температури танення чистого льоду (у первинній шкалі 4°) і кипіння води.

Спочатку шкала Фаренгейта давала можливість грубої оцінки температури. Для більш тонких вимірювань Фаренгейт тричі послідовно поділяв градуси навпіл, що привело до восьмикратного зменшення одиниці. При цьому температура танення льоду стала дорівнювати 32°, а температура тіла людини — 96°. Температура танення льоду у ті часи передбачалася ненадійною, оскільки вже були відомі випадки переохолодження рідин.

Температура кипіння води була спочатку величиною похідною і дорівнювала 212°. Фаренгейт провів пошук надійних фіксованих точок шкали й установив, що температура суміші льоду з водою стабільна при значній варіації зовнішніх умов, а температура кипіння води залежить від барометричного тиску. Шкала Фаренгейта набула широкого поширення. У 1736 р. точки замерзання і кипіння води при фіксованому барометричному тиску були прийняті як основні для всіх шкал.

Близько 1760 р. Ламберт, німецький астроном, оптик і зодчий, прийшов до висновку про достатність в абсолютній шкалі однієї фіксованої крапки. Другою такою точкою повинен бути абсолютний нуль. Температура танення льоду була обрана рівно 1000°, при цьому температура кипіння води виходила величиною похідною і дорівнювала 1370°. Незважаючи на явні переваги, практичного застосування шкала Ламберта не одержала.

Після установлення фіксованих точок шкали природно виникли питання інтерполяції, що привело до ретельних досліджень стекол і термометричних рідин. Спостереження, проведені на термометрах з однакового скла, що заповнювалися водою, олією, спиртами, ртуттю, показали різний хід меніска рівня рідини при проміжних температурах. У цих дослідженнях була виявлена температурна інверсія густини води при 4 °С.

Одна з перших пропозицій метрологічної основи інтерполяції була зроблена пізанським професором Ренальдіні у 1694 р. Вона полягала у тому, що проміжне значення показання термометра визначалося пропорційними частками суміші, складеної з киплячої води і води, зливої з льоду, що тоне. При очевидних принципових перевагах практична реалізація такого методу виявилася пов'язаною з нездоланими труднощами.

Шведський математик і геодезист **Цельсій** у 1742 р. запропонував розділити у ртутному термометрі діапазон між точками кипіння води і танення льоду на 100 рівних частин. У цій шкалі точці плавлення льоду відповідало 100°, а кипіння води — 0°. У 1750 р. шкала була «звернена» **Стремером** — одним зі співробітників і учнів Цельсія. Подібна шкала з нулем при кипінні води і 150° при її замерзанні була запропонована раніше, у 1740 р., французьким академіком Іслем. Значення основа такого розподілу шкали була з часом втрачена.

До початку ХХ ст. нарівні зі стоградусною шкалою Цельсія була поширена шкала, запропонована у 1730 р. французьким зоологом і фізиком Реомюром для термометрів, заповнених 80%-вим водяним розчином етилового спирту. У шкалі Реомюра система розподілу на градуси була прийнята такою ж, як у флорентійському термометрі: один градус відповідав

зміні об'єму рідини на одну тисячну частку. За початок відліку Реомюр прийняв температуру льоду, що тане, температура кипіння води відповідала 80°.

На початку XIX ст. у пошуках «абсолютного» метрологічного приладу повернулися до ідеї газового термометра. Відкриті на той час закони Гей-Люссака і Шарля дозволяли припускати, що у газових термометрах показання не буде залежати від виду газового заповнення. Однак при подальшому уточненні методів виміру в газах були виявлені істотні індивідуальні відхилення. Ретельні дослідження французького фізика **Реньо** показали, що коефіцієнти розширення газів залежать від їхньої густини і ступеня видалення за температурою від стану скраплення. Підвищення температури і зниження тиску наближають гази до ідеального. Так, при 320°C та нормальному тиску **Реньо** не вдалося знайти різниці у показаннях газових термометрів, заповнених воднем, повітрям і вуглекислим газом. У тих же умовах сірчистий газ відрізнявся від водню не тільки значенням коефіцієнта, але і мінливістю цієї величини. Реньо установив, що зі зниженням тиску це розходження стає менш помітним. Таким чином, розподіл температурної шкали не одержав бажаної обґрунтованості аж до кінця XIX ст. Проведені на підставі експериментальних даних Реньо розрахунки пружності водяної пари дали температурну шкалу, що настільки відрізнялася від звичних шкал газових і рідинних термометрів, що вона не набула поширення.

Порівняльні вимірювання показали, що в основному діапазоні 0...100 °C показання водневого термометра систематично нижче, ніж показання термометрів, заповнених іншими газами. За межами фундаментального діапазону показання термометра були тим вище, ніж легше газ. У точках 0 і 100 °C показання всіх термометрів вважалися однаковими.

Одночасно з чисто експериментальними дослідженнями проводилися і теоретичні пошуки непорушної шкали. Щодо цього, то заманливо було скористатися функцією Карно, що не залежить від речовини і є функцією однієї тільки температури.

У 1848 р. Томсон (лорд Кельвін) запропонував вибрати градус температурної шкали таким чином, щоб у його межах ефективність ідеальної теплової машини була однаковою, тобто щоб значення температури приймалося пропорційним значенню ефективності теплової енергії. Надалі він звернув увагу на те, що звична температура досить близька за величиною, зворотній функції Карно. Зворотна функція Карно і була запропонована як основа для абсолютної температурної шкали у 1854 р. Пряме здійснення такої шкали за допомогою ідеальної теплової машини, здатної

працювати на порівняльно малих перепадах у широкому діапазоні температур, практично неможливо. У 1862р. Томсон разом з англійським фізиком Джоулем розробив експериментальний метод оцінки відхилення реального газу від ідеального (ефект Джоуля — Томсона). Перші ж дослідження ефекту Джоуля — Томсона на різних газах показали, що значення температур по шкалі повітряного термометра при нормальному тиску несуттєво відхиляються від абсолютної термодинамічної температурної шкали, а по шкалі водневого термометра відхилення знехтувально малі.

На підставі досліджень Джоуля і Томсона з урахуванням відомих даних про неідеальність різних газів у 1887р. Міжнародним комітетом мір і вагів було прийняте рішення про затвердження як температурний еталон водневого термометра постійного об'єму (щільності) з початковим тиском (при 0 °C) 1 мм. рт. ст. і стоградусним рівномірної за тиском розподілом шкали у проміжку між точками танення льоду і кипіння води при нормальному тиску. Таким чином, було створено технічний засіб передачі термодинамічної температурної шкали практичним вимірам. Громіздкість, складність і повільність вимірів привели до необхідності створення проміжного засобу такої передачі у вигляді еталонних скляних ртутних термометрів. Проведені дослідження показали, що максимальний розкид показань ртутних еталонних термометрів з вередура(назва сорту скла) різних плавков при 50 °C не перевищує 0,02 K.

У 1906р. Штоком і Нільсеном був запропонований термометр із використанням пружності пар насичення. У середині ХХст. такі термометри широко застосовувалися на транспорті, зокрема автомобільному. Потім їх змінили біметалічні термовібраційні елементи. Сьогодні принцип виміру температури за тиском насичених пар використовується лише у лабораторній практиці в області низьких температур.

У 1827р. німецький фізик Ом знайшов залежність електричного опору різних провідників від їхньої температури. Перший термометр опору був виготовлений Сименсом у 1871р. для вимірювання температури у печах. Платинові термометри опору знайшли застосування як прецизійний інструмент після досліджень англійського фізика Каллендара (1886р.).

Існування металевих сплавів з настільки слабо вираженою залежністю опору від температури, що нею можна зневажити (для константану вона приблизно в 100 разів менше, ніж для платини, срібла, міді), дозволяє реалізувати ефективний мостовий інструмент для прецизійних вимірів, включаючи метрологічні. Значним внеском у підвищення чутливості таких приладів з'явилося застосування напівпровідників. Температурний

коефіцієнт напівпровідникових елементів на порядок вище, ніж чистих металів. У 1948 р. фірма «Дженерал моторс» (США) випустила першу партію таких приладів, назвавши їх термісторами.

У 1821 р. німецький фізик Зеебек відкрив термоелектричний ефект і вказав на можливість використання цього ефекту для виміру температури. Практичні виміри на основі термоелектрики були проведені лише наприкінці XIX в. майже одночасно і незалежно один від одного французькими вченими Беккерелем і Ле Шательє у 1887 р., Барусом у 1889 р. Великий проміжок часу між відкриттям ефекту і його застосуванням для виміру температури викликаний непорозумінням, пов'язаним з помилковими публікаціями Реньо. Авторитетне твердження Реньо викликало недовіру до першого досвіду термоелектричного виміру температури, проведеному ще в 1836 р. французьким фізиком Пуїе.

Докладні дослідження дозволили вибрати приблизно десяток термоелектродних матеріалів, що мають практично прямолінійні температурні характеристики. Особлива перевага термопар складається у можливості виміру практично в точці. Об'єм спаю термопар у багато разів менше резервуара ртутного термометра, тому вони знайшли широке застосування як у промисловій, так і (особливо) у лабораторній дослідницькій практиці. На сьогодні переважна більшість температурних вимірів проводиться за допомогою термопар.

У другій половині XIX ст. застосування ймовірно-статистичного підходу дозволило на новій основі одержати багато теоретичних результатів. **З них для термометрії важливими виявилися узагальнення законів випромінювання, отримані Планком, і фундаментальне рівняння Найквіста, що зв'язує основні параметри шумових явищ.** Ці результати поряд з ідеальним газовим термометром могли бути основою для абсолютної термодинамічної температурної шкали. Наступний розвиток ймовірно-статистичного методу привів до виникнення понять про нерівновагу і негативну абсолютну температуру.

Температура є інтенсивним параметром. Інші шість основних метрологічних параметрів — довжина, маса, час, сила світла, кількість електрики, кількість речовини — за своєю природою екстенсивні і мають властивість суперпозиції. Додавання і розподіл основних одиниць, наприклад кілограма, забезпечує надійну метрологічну основу виміру маси при довільно великих і малих значеннях вимірюваної величини. Температура такою властивістю суперпозиції не володіє, і це завжди додавало великих труднощів у проведенні вимірювань.

Для практичних цілей поряд з теоретичною термодинамічною температурною шкалою вводилися шкали, зв'язані з визначеною системою реперних точок і засобів реалізації інтерполяції. У 1889 р. Перша міжнародна конференція за мірами і вагами затвердила «Нормальну водневу шкалу». Наступні корективи у редакції температурних шкал вносилися після ретельної попередньої підготовки на міжнародних офіційних зборах у 1927 р., 1948 р., 1968 р. та 1990 р. На теперішній час діє Міжнародна температурна шкала (1990 р.), позначена скорочено МТШ-90.

У широкому діапазоні вимірювань газовий термометр тривалий час був єдиним засобом передачі термодинамічної температурної шкали. Про складність роботи з ним можна судити по тому, що цей інструмент вимагає кондиційованого приміщення площею в кілька десятків квадратних метрів. Ця обставина привела до того, що передача шкали охоплена складною системою реперних крапок і засобів інтерполяційної передачі у вигляді термометрів опору і термопар. Природний для метрологів консерватизм став гальмом подальшого розвитку. Якими ж можуть бути очікувані шляхи розвитку метрології?

Дотепер тільки три фундаментальних явища можуть бути покладені в основу передачі. Вони виражені рівняннями Клапейрона, Планка і Найквіста. Значне підвищення культури теплотричних і частотно-спектральних вимірів за допомогою нової апаратури відкриває можливості перерозподілу діапазонів передачі шкали. На підставі закону Стефана — Больцмана (окремий випадок закону Планка) можна провести надійну передачу з похибкою, що несуттєво перевищує 10–4 вимірюваної величини абсолютної температури, починаючи з 200 К й вище, без обмеження.

Поява апаратури частотно-шумового аналізу з високим розпізнаванням дозволить створити чуттєві елементи, які за розмірами трохи перебільшують такі у термометрів опору і термопар, безпосередньо передаючи термодинамічну температурну шкалу в кожному проведеному вимірюванні. При цьому відпадає потреба у Міжнародній температурній шкалі з її системою реперних точок. Безконтактна термометрія зможе спиратися на закон Планка, зокрема на рівняння Стефана — Больцмана, контактна — на рівняння Найквіста.

1.2. Визначення основних понять параметрів мікроклімату виробничих приміщень та їх нормування

Метеорологічні умови або мікроклімат у виробничих приміщеннях — умови внутрішнього середовища приміщення, які впливають на тепловий обмін працюючих з оточуючим середовищем і визначаються діючими на організм людини поєднанням температури, відносної вологості, швидкості руху повітря. На мікроклімат впливає також температура оточуючих поверхонь. Важливим є і атмосферний тиск, який впливає на парціальний тиск основних компонентів повітря, тобто на процес дихання.

Коротко охарактеризуємо основні параметри метеорологічних умов [2].

Температура (t , °C) характеризує тепловий стан повітря, тобто кінетичну енергію його молекулярних рухів.

Вологовміст повітря у виробничому приміщенні оцінюється відносною вологістю (φ , %), що являє собою відношення абсолютної вологості до максимально можливої при даній температурі.

Швидкість руху повітря (V , м/с) оцінюється вектором усередненої швидкості переміщення повітряних потоків (струменів) під дією різних сил, що їх викликають.

У приміщеннях, що мають надлишки зайвого тепла треба враховувати такий показник, як **інтенсивність теплового опромінення від нагрітих поверхонь (E , Вт/м²)**. Джерелами опромінення можуть бути всі випромінюючі поверхні виробничого середовища, що мають температуру понад +36...37 °C.

Виробнича діяльність людей на поверхні землі протікає звичайно при **атмосферному тиску**, близькому до тиску над рівнем моря, тобто 101,3 кПа (760 мм. рт. ст.). Однак у ряді випадків атмосферний тиск як виробничий фактор може зустрічатися у вигляді двох основних форм: підвищеного і зниженого атмосферного тиску.

Підвищений тиск має місце при роботі під водою і під землею, наприклад, при будівництві тунелів, мостів, колекторів для каналізаційних стоків, фундаментів гідротехнічних споруд, при проходці стовбурів шахт, у портовому і доковому будівництві та ін.

Знижений тиск має місце при роботі льотного складу авіації, космонавтів, у гірській місцевості (на висоті понад 4 км.).

На життєдіяльність працюючого значною мірою впливає **газовий склад повітря**.

Газовий склад повітря, очищеного від пилу, водяної пари та інших домішок, в 100 км товщі від поверхні Землі є стабільним, проте повного

розуміння причин, які забезпечують підтримання цієї стабільності, поки що немає. Основними компонентами сухого повітря (% за об'ємом) є: **азот — 78,09; кисень — 20,8; аргон — 0,93; вуглекислий газ — 0,03**, всі інші гази й домішки лежать в межах від $1,8 \cdot 10^{-3}$ — $6 \cdot 10^{-17}$ долей відсотків (табл.1.1) [3, 4].

Таблиця 1.1. — Склад сухого повітря до висоти 100 км

Назва газу	Вміст в повітрі, %		Вагове число	Температура кипіння, °С
	по об'єму	по вазі		
1	2	3	4	5
Азот	78,09	75,52	28,016	195,812
Кисень	20,8	23,15	32, 0	182,972
Аргон	0,93	1,28	39,944	185,707
Вуглекислий газ	0,03	0,05	44,010	78,2
Неон	$1,8 \cdot 10^{-3}$	-	20,010	-245,93
Гелій	$5,24 \cdot 10^{-4}$	-	4,003	-268,94
Кріптон	$3,0 \cdot 10^{-4}$	-	83,7	-153,52
Водень	$5,0 \cdot 10^{-5}$	-	2,016	-252,5
Ксенон	$8,7 \cdot 10^{-6}$	-	131,3	-107,96
Озон	10^{-6}	-	48,0	-111,34
Радон	$6 \cdot 10^{-17}$	-	222,0	-62,0
Сухе повітря	-	-	28,966	-103,0

З табл.1.1 видно, що вагове число сухого повітря близьке до вагового числа азоту. Проте його роль в системі життєзабезпечення людини на даний час до кінця не зрозуміла. Хоча відомо, що в процесі дихання він людиною не засвоюється. Неодноразові спроби виявити вплив азоту повітря на людину успіху не мали. Азотно-кисневе середовище замінювали на гелій-кисневе та людина, перебуваючи в ньому, відчувала підвищене відчуття комфорту. Проте такі відчуття були тимчасовими, бо наступала млявість, прискорювалось настання втомлення.

Слід також відмітити, що кожен з компонентів повітря, впливає на людину інакше, знаходячись в складі повітря, ніж взятий окремо. Так, атомарний кисень немає магнітного моменту, а молекулярний навпаки. Це є дуже важливим, бо магнітна взаємодія навіть при невеликому значенні напруженості поля суттєво впливає на біологічні об'єкти.

Водяна пара становить у середньому від **0,2 до 2,6%**, при цьому є всі підстави вважати, що наявність останньої в механічній суміші газів надає всій системі такі властивості, якими не володіє ні один з її елементів, у тому числі і водяна пара.

Нормування параметрів мікроклімату

Параметри мікроклімату нормуються згідно з вимогами ДСН 3.3.6.042–99[5], який встановлюють **оптимальні** або **допустимі** температури повітря, відносної вологості і швидкості руху повітря для робочої зони виробничих приміщень з урахуванням постійних і непостійних робочих місць.

Оптимальні мікрокліматичні умови — з'єднання параметрів мікроклімату, які при тривалому і систематичному впливі на людину забезпечують збереження нормального функціонального і теплового стану організму без напруження реакцій терморегуляції. Вони забезпечують відчуття теплового комфорту і створюють передумови для високого рівня працездатності.

Допустимі мікрокліматичні умови — з'єднання параметрів мікроклімату, які при тривалому і систематичному впливі на людину можуть викликати такі тимчасові зміни функціонального і теплового стану організму, що не виходять за межі фізіологічних пристосувальних можливостей. При цьому не виникає ушкоджень чи порушень стану здоров'я, але можуть спостерігатися дискомфортні теплові відчуття, погіршення самопочуття і зниження працездатності.

Норми враховують такі фактори:

1) **пора року:**

- холодний період (сезон) з середньодобовою температурою зовнішнього повітря нижче +10 °С;
- теплий період із середньодобовою температурою +10 °С і вище;

2) **категорія робіт**, яку встановлюють залежно від загальних енерговитрат організму при виконанні різних за важкістю робіт. Енерговитрати визначають засобом непрямої калориметрії за кількістю кисню, що вдихає людина, та кількістю CO₂, яку видихає. Параметри сприятливих метеорологічних умов є різними для різних рівнів фізіологічного навантаження організму. Усі роботи поділяються за витратами енергії на такі **три категорії**.

- **Легкі фізичні роботи (категорії Ia, Ib):**

Ia — при яких витрати енергії не перевищують 139 Вт. До них належать роботи, що виконуються сидячи і супроводжуються незначним фізичним напруженням, (робота за комп'ютером, основні процеси точного

приладобудування і машинобудування, на годинниковому, швейному виробництвах, у галузі управління та ін.);

Іб — при яких енерговитрати становлять 140...174 Вт. До них належать роботи, які виконуються сидячи або стоячи, з незначною ходьбою і які супроводжуються деяким фізичним напруженням (на підприємствах зв'язку, майстри у різних видах виробництва та ін.).

• **Фізичні роботи середньої важкості (категорії Па, Пб):**

Па — при яких витрати енергії становлять 175...232 Вт. До них належать роботи, що пов'язані з постійною ходьбою, виконуються сидячи чи стоячи, але не потребують переміщення вантажів вагою більш 1 кг (механіко-складальні цехи машинобудівних підприємств, ткацьке виробництво тощо.)

Пб — при яких витрати енергії становлять 233...290 Вт. До них належать роботи, що пов'язані з ходьбою і перенесенням невеликих (до 10 кг) вантажів (механізовані ливарні, ковальські, термічні, зварювальні цехи машинобудівних заводів і металургійних підприємств).

- **Важкі фізичні роботи (категорія Пв)** — охоплює види діяльності, при яких витрати енергії перевищують 290 Вт. До них належать роботи, пов'язані із систематичним фізичним напруженням, а також з постійними пересуваннями і перенесенням значних (понад 10 кг) вантажів (основні процеси мартенівського, ливарного — з набиванням і заливанням опок, прокатного, ковальського — з ручним куванням, термічного виробництва та ін.).

Контрольні запитання.

1. Поясніть, у чому були труднощі вчених давньої Греції у складанні чіткого уявлення про поняття температури?
2. В якому році та ким було створено перший термометр?
3. В якому році та ким було відкрито термоелектричний ефект?
4. В якому році та ким було розроблено термометри опору?
5. Чи володіє температура суперпозицією?
6. Які параметри мікроклімату нормуються у виробничому приміщенні?

Лекція 2.

Контроль температури виробничих процесів за допомогою термопар

ПЛАН

- 2.1. Вступ. Важливість температурних вимірювань у промисловості.
- 2.2. Термоелектричні явища.
- 2.3. Термоелектричний термометр.
- 2.4. Вимоги, які висувають до термоелектронних сплавів.
- 2.5. Сплави для промислових термопар та термоперетворювачі.
- 2.6. Вторинні електричні прилади для вимірювання температури.

2.1. Вступ. Важливість температурних вимірювань у промисловості.

Температура — один з найважливіших контрольованих параметрів технологічних процесів практично в усіх галузях народного господарства. Відомо, що близько 40% усіх вимірів у промисловості і наукових дослідженнях складають виміри температури. Не менше 60% усіх температурних вимірів приходить на термоелектричні термометри, або як їх часто називають, термопари. Область температур, що вимірюються термопарами, охоплює діапазон від 0,5 до 3000 К [1].

Крім термопар контроль температури виробничих процесів здійснюють за допомогою термометрів, пірометрів та інших приладів.

Широке застосування у промисловості і наукових дослідженнях термопари отримали завдяки простоті, зручності монтажу, можливості виміру температури у важкодоступних ділянках і локальної температури. До переваг термопар можна віднести також широкий діапазон вимірюваних температур, малу інерційність, можливість виміру температури поверхні, температури швидкоплинних процесів, малих різниць температур і т.п. Термопари можуть забезпечувати високу точність (у деяких випадках до 0,01 К) і високу чутливість (до 80–100 мкВ/К) [1,6–8].

Усі основні параметри термоелектричних термометрів визначаються властивостями чуттєвих елементів, що, у свою чергу, визначаються властивостями термоелектродних сплавів, з яких вони виготовлені. Однією з основних характеристик термоелектродних сплавів є стабільність цих властивостей при експлуатації термопар при високих і низьких температурах у різних середовищах і при різних зовнішніх впливах: механічних, електричних

та ін. Дуже велике значення мають технологічність, а також однорідність і відтворюваність термодинамічних властивостей в умовах промислового виробництва термоелектродних сплавів і виготовлення з них термопар.

Як термоелектродні матеріали застосовують найрізноманітніші кольорові, благородні, тугоплавкі метали і сплави. Широке використання перехідних металів і сплавів на їхній основі обумовлено порівняно високою термоелектрорушійною силою (т.е.р.с.). В області криогенних температур останнім часом використовуються сплави неперехідних металів з феромагнітними легуючими елементами, які також розвивають велику т.е.р.с.

Велика кількість найчастіше суперечливих вимог до термоелектродних сплавів дуже ускладнює створення необхідних матеріалів. У ряді випадків умови експлуатації термопар або вимоги гарантованої точності вимірів змушують використовувати, наприклад, сплави з невисокою чутливістю, але працездатні у визначених температурних та інших умовах із прийнятною стабільністю.

У майбутньому розробка нових термоелектродних сплавів, імовірно, виявиться доцільною лише в окремих спеціальних випадках, наприклад для роботи в таких екстремальних умовах, у яких відомі сплави не можуть бути застосовні.

2.2. Термоелектричні явища.

Термоелектричними називаються явища, обумовлені зв'язком між тепловими й електричними струмами. На сьогодні сформульована мікроскопічна (кінетична) теорія термоелектрики, що зв'язує спостерігаємі термоелектричні властивості, з характеристиками енергетичних спектрів і процесів розсіювання носіїв струму у твердих тілах, і термодинамічна теорія, що пояснює макроскопічні закономірності термоелектричних явищ і зв'язок між різними термоелектричними ефектами. У термодинамічній теорії використовуються лінійні співвідношення між «потокami» і узагальненими «силами», що викликають ці потоки. Окремими випадками таких співвідношень є закон Ома, що встановлює пропорційність між електричним струмом (потокom) в ізотермічному провіднику й електричному полі (градієнтом електричного потенціалу) та закон Фур'є, що встановлює пропорційність між тепловим потокom під час відсутності електричного струму і градієнтом температури. Коефіцієнтами пропорційності в цих законах є відповідно ізотермічна провідність і коефіцієнт теплопровідності під час відсутності електричного струму. У більш загальному випадку, коли в провіднику одночасно присутні градієнти температури ΔT і електричного

потенціалу ΔV (узагальнені сили), виникають обидва потоки — заряду і тепла Q , лінійні співвідношення між силами і потоками набувають вигляду[6]:

$$I = L_{11}\Delta V + L_{12}\Delta T; \quad (2.1)$$

$$Q = L_{21}\Delta V + L_{22}\Delta T; \quad (2.2)$$

де L — коефіцієнти.

Співвідношення (2.1) і (2.2) дозволяють у принципі передбачити існування трьох термоелектричних ефектів: Зеебека, Пельтьє і Томсона, встановлених експериментально[6].

Ефект Зеебека. У замкнутому ланцюзі, що складається з двох різнометалевих провідників А і В (рис. 2.1, а), температура з'єднань спаїв яких підтримується різною, з'являється електричний струм. Електрорушійна сила або рівна їй різниця потенціалів на кінцях розімкнутого ланцюга, що складає з двох різнометалевих металів, коли температури спаїв різні, називається термоелектрорушійною силою або скорочено т.е.р.с. (інтегральної т.е.р.с.) пари АВ та позначається E_{AB} (рис. 1.1, б). Цей ланцюг називається термоелементом чи (у термометрії) термопарою. Для нескінченно малої різниці температур спаїв dT т.е.р.с. $(dE_{AB} = e_{AB}dT)$, де e_{AB} — диференціальна т.е.р.с. пари АВ.

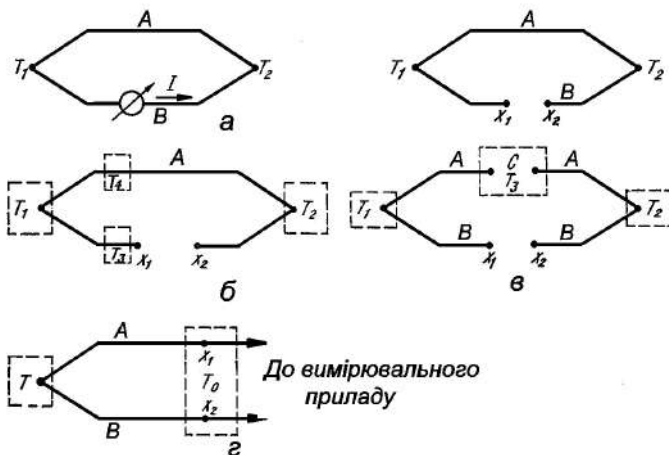


Рис. 2.1. Термоелектричні ланцюги і закони термоелектрики[6]: а — термоелектричний струм I у замкнутому контурі і термоелектричний різниці потенціалів V у розімкнутому контурі; б — до закону однорідного ланцюга $V_{xx} = E_{AB}(T_1, T_2)$; в — до закону проміжних металів $V_{x1x} = E_{AB}(T_1, T_2)$; г — схема виміру температури термопарою.

Ефект Пельтьє. Якщо через область контакту двох різнорідних провідників тече електричний струм I , то в цій області виділяється чи поглинається в одиницю часу деяка кількість тепла Q_{π} обумовлена виразом[6]:

$$Q_{\pi} = \Pi \cdot I, \quad (2.3)$$

де Π — коефіцієнт Пельтьє.

На відміну від Джоулевого тепла, пропорційного квадрату сили струму і завжди виділяється в провіднику, теплота Пельтьє носить зворотній характер, тобто може виділятися чи поглинатися залежно від напрямку струму.

Ефект Томсона являє собою поглинання чи виділення тепла в однорідному провіднику, в якому тече струм I і уздовж якого існує градієнт температури ΔT . Теплота Томсона (в одиницю часу) визначається виразом[6]:

$$Q = \sigma \Delta T I, \quad (2.4)$$

де σ — коефіцієнт Томсона.

У замкнутому ланцюзі, по якому протікає електричний струм, при наявності градієнта температури виникають усі три термоелектричні ефекти, зв'язок між якими визначається співвідношеннями Кельвіна:

$$\sigma = T dS/dT; \Pi = TS, \quad (2.5)$$

де S — абсолютна диференціальна т.е.р.с.

У зв'язку з тим, що температуру термопарами звичайно вимірюють під час відсутності струму, основним ефектом, істотним для розуміння роботи термопар, є ефект Зеебека, два інших ефекти у цьому випадку значення не мають. Численні експериментальні дослідження властивостей термоелектричних ланцюгів дозволили сформулювати такі три емпіричні закони.

Закон однорідного ланцюга (закон Магнуса). У замкнутому ланцюзі, що складається з однорідного провідника, електричний струм не може підтримуватися за рахунок перепадів температури:

$$E_{AA}(T_2, T_1) = 0. \quad (2.6)$$

Наслідком цього закону є той факт, що в ланцюзі, що складається з двох різнорідних провідників, спаї між якими підтримуються при двох різних температурах T_1 і T_2 , т.е.р.с не залежить від розподілу температури уздовж провідників, а лише від температур спаїв (див. рис. 2.1, б).

Закон проміжних металів. Основне формулювання цього закону: алгебрична сума т.е.р.с. у ланцюзі, що складається з будь-якої кількості

різних металів, дорівнює нулю, якщо весь ланцюг знаходиться при одній температурі:

$$E_{AC}(T_I, T_I) = E_{AB}(T_I, T_I) + E_{BC}(T_I, T_I) = 0. \quad (2.7)$$

У цьому формулюванні закон аналогічний другому початку термодинамики, тому що наявність не рівної нулю т.е.р.с. привело б до появи струму, що, у свою чергу, викликало б охолодження одних частин ланцюга і нагрівання інших. Це означало б, що повинен відбуватися перенос тепла від ділянок з більш низькою температурою до ділянок з більш високою температурою під час відсутності зовнішнього джерела енергії, що суперечить другому початку термодинамики. З закону випливає, що при введенні у контур, який містить два різномірних провідники *A* і *B* з температурами спаїв T_1 і T_2 , третього провідника *C*, що знаходиться при однаковій по всій його довжині температурі T_3 , т.е.р.с. $E_{AB}(T_I, T_2)$ не міняється (рис. 2.1, в).

Еквівалентне формулювання закону проміжних металів: т.е.р.с., що виникає у ланцюзі з двох різних провідників *AB*, дорівнює алгебричній сумі т.е.р.с. ланцюгів, утворених третім провідником *C* й провідниками *A* та *B*:

$$E_{AB}(T_1, T_2) = E_{AC}(T_1, T_2) + E_{BC}(T_1, T_2). \quad (2.8)$$

Закон послідовних, або проміжних температур. Т.е.р.с. ланцюга, що складається з двох різних однорідних провідників *A* і *B*, спаї яких мають температури T_3 і T_1 дорівнює алгебраїчній сумі т.е.р.с. того ж ланцюга при температурах спаїв T_3 і T_2 , T_2 і T_1 .

$$E_{AB}(T_3, T_1) = E_{AB}(T_3, T_2) + E_{AB}(T_2, T_1). \quad (2.9)$$

Усі три закони можна об'єднати і сформулювати так: т.е.р.с. ланцюга, складеного з декількох різних однорідних провідників, є функцією тільки температури спаїв і не залежить від градієнтів температури уздовж провідників. На основі цих законів здійснюється практичне використання термоелектрики у термометрії. З законом однорідного ланцюга пов'язано застосування найбільш поширеної схеми виміру температури термопарами, при якій один зі спаїв («вільні кінці») підтримується при постійній температурі, а інший спай знаходиться при вимірюваній температурі (рис. 2.1, г). При цьому величина сигналу є тільки функцією вимірюваної температури. Використовуючи закон проміжних температур, можна вносити виправлення на температуру вільних кінців і градувати термопару. Ґрунтуючись на законі проміжних металів, можна вводити в ланцюг термопар вимірювальний прилад, а також при необхідності конструкційні,

струмоведучі, чи елементи об'єкта, температура якого вимірюється, за умови їхньої ізотермічності. При цьому результуюча т.е.р.с. зберігається незмінною. Цей же закон служить підставою використання так званих **подовжувочних** проводів.

Т.е.р.с. термопар є складною функцією температури, але для багатьох пар металів у діапазоні температур у кілька сотень градусів її величину можна апроксимувати з прийнятною точністю поліномом другого ступеня.

З термодинамічного розгляду термоелектричних ефектів випливає, що т.е.р.с. пари АВ дорівнює алгебричній сумі т.е.р.с., які виникають у кожній з галузей, тобто для пари однорідних провідників[6]:

$$E_{AB}(T_1, T_2) = \int_{T_1}^{T_2} S_{AB}(T) dT = \int_{T_1}^{T_2} S_A dT - \int_{T_1}^{T_2} S_B dT. \quad (2.10)$$

Величини S_A та S_B являють собою абсолютну (диференціальну) т.е.р.с. матеріалів А та В, тобто різницю потенціалів, що виникає на кінцях провідників А та В, поміщених у температурне поле з одиничним градієнтом. Ці величини є характеристикою даного матеріалу подібно, наприклад, питомому електричному опору чи коефіцієнту теплопровідності і залежать від температури, складу і стану матеріалу.

Диференціальна т.е.р.с. термопари являє собою різниця абсолютних (диференціальних) т.е.р.с. кожної з гілок (мереж):

$$e_{AB} = dE_{AB}/dT = S_A - S_B. \quad (2.11)$$

У реальних умовах т.е.р.с. завжди вимірюється в електричному ланцюзі, що складається, як мінімум, із двох матеріалів — термоелектродного і матеріалу сполучних дрітків. У зв'язку з цим у технічній літературі іноді висловлюється помилкова думка про те, що т.е.р.с. подібно теплоті Пельтьє виникає в області спаю (зварювання) двох металів. Тим часом для появи т.е.р.с. не потрібно двох металів, оскільки вона виникає в однорідному провіднику в області градієнта температури (див. рівняння (2.3) і (2.11)).

Електрична різниця потенціалів ΔV , що виникає на кінцях однорідного провідника, уздовж якого створюється перепад температури ΔT , включає, крім т.е.р.с., $S\Delta T$ (тобто властивості переносу) і зміна хімічного потенціалу μ носіїв струму (тобто статичну характеристику):

$$\Delta V = [(1/e)(d\mu/dT) + S] \Delta T. \quad (2.12, a)$$

Аналогічно для термопари, що складає з двох електродів А і В, різниця потенціалів на кінцях цих електродів:

$$\Delta V_{AB} = [(1/e) (d\mu/dT) (\mu_A - \mu_B) + SA - SB] \Delta T. \quad (2.12, б)$$

У реальних умовах при наявності сполучних проводів, підключених до кінців провідника чи до вільних кінців термопари, з умови безперервності електрохімічних потенціалів у точках з'єднань (електричний і хімічний потенціали мають у цих точках скачки) впливає, що вимірювана під час відсутності струму різниця потенціалів між кінцями цих проводів дорівнює: у випадку одного провідника X

$$\Delta V_{XL} = (S_X - S_L) \Delta T, \quad (2.13, а)$$

у випадку термопари з електродами А і В

$$\Delta V_{AB} = (S_A - S_B) \Delta T, \quad (2.13, б)$$

де індекси А, В, X та L належать до електродів і сполучних дротів.

Таким чином, вимірювана різниця потенціалів на кінцях термопари визначається тільки величиною т.е.р.с. і не включає стрибків хімічного потенціалу в точках з'єднань (спаїв).

Абсолютну т.е.р.с. можна знайти непрямым шляхом по температурній залежності теплоти Томсона, що була виміряна калориметрично, за допомогою співвідношення:

$$S = \int_0^T (\sigma/T) dT. \quad (2.14)$$

Абсолютна т.е.р.с. металів і сплавів обчислюється зі співвідношення (2.13) на підставі результатів виміру диференціальної т.е.р.с. щодо еталона порівняння, значення абсолютної т.е.р.с. якого відомі. Як еталон використовують зазвичай платину, мідь, золото, вольфрам (для температур > 100 К) і свинець (для температур 10–350 К). В області низьких температур (< 20 К) абсолютну т.е.р.с. визначають за результатами безпосередніх вимірів щодо надпровідників, т.е.р.с. яких при температурах надпровідного переходу зникає мала. Значення абсолютної т.е.р.с. більшості металів і сплавів коливаються в межах (0–80) мкВ/К.

При обліку концепції абсолютної т.е.р.с. стає очевидним визначення знака т.е.р.с. Т.е.р.с. пари АВ позитивна, якщо $S_A > S_B$; для класичної схеми термопари (див. рис. 2.1, з) матеріал з більш високою позитивною т.е.р.с. (А) має більш високий потенціал на вільному кінці у точці x_1 , якщо температура вільних кінців $T_0 < T$.

У загальному випадку термоелектрична різниця потенціалів на за- тисках контуру, що включає пари неоднорідних термоелектродів, дорівнює:

$$V_{AB} = \oint S_{AB}(x, T) \nu T(x) dx = \oint [S_A(x, T) - S_B(x, T)] \nu T dx. \quad (2.15)$$

звідки для однорідних електродів виходить відоме співвідношення:

$$V_{AB} = \int_{T_2}^{T_1} (S_A - S_B) \nu T dx = \int_{T_2}^{T_1} (S_A - S_B) dT. \quad (2.16)$$

З виразу (2.16) випливає важливий із практичної точки зору результат: частини термоелектричних мереж, що знаходяться в ізотермічних умовах, не дають внеску в т.е.р.с., що спостерігається.

2.3. Термоелектричний термометр

Вимірювання температури, засноване на використанні одного з термо- електричних явищ (ефект Зеебека), здійснюється за допомогою термоелек- тричних термометрів. Чуттєвим елементом термоелектричного термоме- тра служить термопара, а термометричною властивістю є т.е.р.с, що вини- кає в термопарі (рис. 2.2) [6].

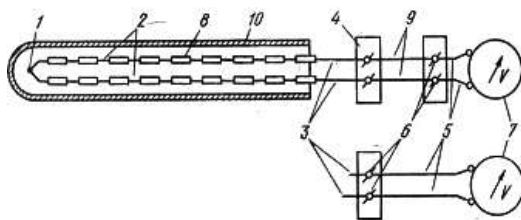


Рис. 2.2. Схема термоелектричного термометра: 1 — робочий спай; 2 — термоелектроди; 3 — вільні кінці; 4 — проміжний спай; 5 — мідні дроти; 6 — реперні спай; 7 — вимірювальний прилад; 8 — ізоляція; 9 — подовжуючі (компенсаційні) дроти; 10 — захист.

Комплект термоелектричного термометра (рис. 2.2) складається з термоелектричного перетворювача, основою якого є термопара, і вторинного приладу (звичайно потенціометра, рідше мілівольметра). У переважній більшості випадків термопара складається з двох термоелектродів (електродів), з'єднаних у робочому спай 4. Якщо вільні кінці 2 термопари знаходяться при постійній температурі, то з'єднуючі проводи виконуються

з електропровідного і дешевого матеріалу (міді). Якщо ж температуру вільних кінців термопар неможливо підтримати постійною, то з'єднуючи термопару і вторинний прилад проводи виконують з матеріалів, що в області температур вільних кінців термопар мають практично ті ж термоелектричні характеристики, що і матеріали термоелектродів. Ці проводи називаються подовжувачами чи компенсаційними (інші назви: подовжувальні, термоелектродні). Подовжувачі дроти слугують для «подовження» термопар і переносу її вільних кінців у зону постійної (мало мінливої) температури. У випадку, коли температура проміжних спаїв однакова, користуються проводами, що у парі мають таку ж температурну залежність т.е.р.с., що і термопара (так звані дроти із сумарною компенсацією). У тому випадку, коли температура проміжних спаїв різна, вживають проводи, кожний з яких має таку ж температурну залежність т.е.р.с, що і відповідний термоелектрод термопар (так звані проводи з поелектродною компенсацією).

Точний вимір температури за допомогою термоелектричного термометра можливо за умови, якщо відома температура вільних кінців. Знання останньої дозволяє внести виправлення на зміну температури реперного спаю в порівнянні з тією, при якій було зроблено градування термометра. Використання подовжувачих проводів не запобігає від необхідності введення виправлень на температуру реперного спаю, тому більшість промислових термометрів постачають автоматичним пристроєм для введення таких виправлень.

Існують термопары, які не вимагають виправлень на температуру реперних спаїв, у яких використовуються термоелектродні сплави, що розвивають у парі т.е.р.с, яка не залежить від температури вільних кінців у широкій області температур (рис. 2.3) [6].

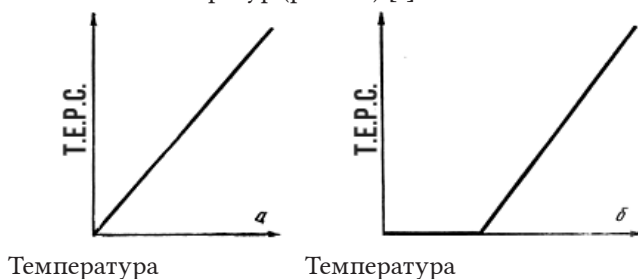


Рис. 2.3. Градувальні криві термопар: а – звичайна термопара; б – термопара, що не вимагає термостатування вільних кінців і виправлень на їхню температуру.

Термоелектричні явища та їхні основні закономірності, термоелектричні термометри (термопари) і практика виміру ними температури розглянуті в багатьох монографіях і у відповідних розділах посібників та праць конференцій з термометрії.

2.4. Вимоги, які пред'являють до термоелектронних сплавів

Усі найважливіші характеристики термоелектричного термометра: величина сигналу, чутливість, діапазон вимірюваних температур, ресурс, стабільність та інше, залежать в основному від властивостей матеріалів, що утворюють чуттєвий елемент термометра — термопару. Для виготовлення термопари принципово можливо користатися парою будь-яких різних металів і сплавів, однак доцільно використовувати тільки визначені, так звані термоелектродні сплави, що одержали поширення у вимірювальній техніці. Однією з головних причин того, що для термопари використовуються цілком визначені сплави, є різноманіття і складність пропонованих до них таких вимог.

1. Т.е.р.с. термоелектродних сплавів, що утворюють термопару, повинна бути досить великою для того, щоб її можна було виміряти з необхідною точністю. Вона повинна бути безперервною й однозначною функцією температури, без екстремумів в інтервалі температур, для якого призначена термопара. Бажано, щоб ця функція була максимально близька до лінійної. У термопар, для яких не вимагаються виправлення на температуру вільних кінців, необхідно, щоб величина т.е.р.с. у визначеному інтервалі температур була мізерно малою.
2. Температура плавлення термоелектродних сплавів повинна бути вище максимальної температури, при якій термопара повинна працювати. Необхідно, щоб температура плавлення сплаву перевищувала максимальну температуру експлуатації не менше чим на 50–150 °С. Це перевищення може бути і більшим, якщо при високих температурах міцність термоелектродних сплавів різко падає і (або) вони активно взаємодіють з навколишнім середовищем та ін.
3. Термоелектродні сплави повинні бути корозійно-стійкими у тих середовищах і при тих температурах, при яких повинна працювати термопара. У більшості випадків мова йде про стійкість на повітрі, а коли кажуть про інші середовища, то часто виявляється необхідним, щоб поряд з корозійною стійкістю в цих середовищах була

забезпечена також стійкість на повітрі. Цій вимозі термоелектродні сплави далеко не завжди задовольняють, тому термоелектроди термопар прагнуть захистити від впливу зовнішнього середовища.

4. Термоелектродні сплави повинні відрізнятися відтвореними й однорідними властивостями при виробництві їх у необхідних масштабах. У сучасному приладобудуванні легше використовувати термоелектродні сплави з малою, але відтвореною т.е.р.с., ніж сплави з великою і слабо відтворюваною т.е.р.с. Похибка відтворюваності т.е.р.с. (допуск на т.е.р.с.) термоелектродних сплавів, що утворюють термопару, рівну $\pm 1\%$, можна вважати прийнятною для деяких видів промислових термопар, хоча бажано, щоб вона була ще меншою.
5. Сплави для термопар у процесі експлуатації і градування повинні зберігати свою термоелектричну характеристику незмінною. Величина нестабільності т.е.р.с. термопар слугує критерієм відмовлення при оцінці їхньої надійності. Бажано, щоб нестабільність т.е.р.с. промислових високотемпературних термопар не перевищувала 1% від вимірюваної величини після експлуатації протягом 1000 год. У багатьох випадках і ця цифра здається надмірно великою.
6. Сплави для термопар повинні бути досить пластичними, щоб з них було можливо виготовляти дріт (у деяких випадках і інші види напівфабрикатів), і разом з тим досить міцними. Остання вимога особливо важлива для термопар, що піддаються механічним навантаженням, особливо знакозмінним.

2.5. Сплави для промислових термопар та термоперетворювачі

Сплави для промислових термопар

Кількість сплавів та їхніх комбінацій, коли-небудь досліджених або використаних для створення термопар, включаючи сплави для подовжуючих проводів, перевищує 300. Проте сьогодні у промисловості і наукових дослідженнях застосовується значно менша кількість термоелектродних сплавів (біля 100).

Конструктивне оформлення термоперетворювачів залежить від умов їхньої експлуатації. Вони класифікуються: за способом контакту з вимірюваним середовищем — на занурюємі і поверхневі; за умовами експлуатації — на стаціонарні і переносні; за захищеністю від впливу навколишнього середовища — на звичайні, пилозахищені, водозахищені, захищені від агресивного середовища, вибухобезпечні, іскробезпечні, захищені від

інших зовнішніх впливів; за герметичністю до вимірюваного середовища — на герметичні і негерметичні; за впливом кліматичних факторів — на холодостійкі, теплотривкі і вологостійкі; за стійкістю до механічних впливів — на звичайні і вібростійкі; за кількістю гарячих спаїв для виміру температури в одній зоні — на одинарні і подвійні; за кількістю зон — на однозонні і багатозонні[1,6].

Електричний опір ізоляції між термоелектродами, металевою частиною захисної арматури, а також між окремими термоелектродами термоперетворювачів з декількома термоелектронними парами складає не менше: 20 МОм при температурі 25 ± 10 °С та відносній вологості 30...80%; 0,5 МОм при температурі 35 ± 2 °С та відносній вологості $95 \pm 3\%$ для вологостійких термоперетворювачів; 1 МОм при температурі до 300 °С; 70 КОм при температурі до 600 °С; 25 КОм при температурі до 800 °С; 5 КОм при температурі до 1 000 °С. Електричний опір ізоляції термоперетворювачів з діаметром захисної арматури 0,1...5,0 мм і термоперетворювачів з робочим діапазоном вимірюваних температур понад 1 000 °С установлюється нормативно-технічними документами на конкретні типи, термоперетворювачів. Нормуються також електричний опір електродів і динамічні параметри термоперетворювачів.

ГОСТ 3044–84 передбачає виготовлення термоперетворювачів типу ТПП, ТПР, ТХА, ТХК, ТМК, ТЖК і ТВ із такими номінальними статичними характеристиками: ПП (S) ПР (Y); ХА (R) \ ХК(L); МК (M); МК (T); ЖК (1); ВР(А)-1; ВР (А)-2 ВР (А)-3.

Перелік найбільш поширених термопар для виміру високих температур наведений у додатку 1, низьких температур у додатку — 2[6]. Усі термоелектродні сплави можна розділити на три групи (див. Додаток 1). Сплави першої групи, невеликий по числу (див. термопари № 1–4, 16, 17, 21, 23, 25), виробляються у великих кількостях і широко використовуються у всіх галузях народного господарства. Склади сплавів, сортамент і властивості термоелектродного дроту, а також властивості відповідних термопар стандартизовані. За допомогою цих основних стандартних термопар виробляється переважна більшість вимірів температури. Сплави другої групи (їх кілька десятків) також використовуються для виготовлення промислових термопар (термопари № 5–15, 18–20, 22, 24), область застосування яких набагато вужче і пов'язана з необхідністю вимірів температури, що неможливо, неефективно чи важко проводити за допомогою стандартних термопар. Звичайно це сплави для термопар, що працюють у певних діапазонах температур, при визначених зовнішніх умовах, або для термопар із заданою чутливістю у заданій області температур. До цієї групи відносяться,

наприклад, термопари з іридію і його сплавів, за допомогою яких можна вимірювати температуру до 2 200 °С в окисних середовищах; термопари НК-СА і НЖ-СК без виправлення на температуру вільних кінців; високочутливі термопари з паладійовмісних сплавів для вимірів температур 1 000–1 400 °С, а також термопари ВМ і ЦНИИЧМ-1 для вимірів температур розплавів сталей і сплавів, використовуваних в основному в зв'язку з їхньою відносно низькою вартістю.

Сплави третьої групи серійно не виготовляють через дуже обмежену сферу застосування термопар, їхню недостатню вивченість, а також через серйозні утруднення, пов'язані з одержанням однорідних і відтворених за т.е.р.с. термоелектродних матеріалів необхідного сортаменту і механічних властивостей. До цієї групи відносяться термопари Au-Pt і Ag-Pd для точних вимірів при температурах 600 °С, термопари для вимірів в умовах опромінення, наприклад Mo-Nb, чи термопари з електродами зі сплавів Pt-Mo, термопари зі сплавів Mo-Re з підвищеною стійкістю в середовищах, що містять вуглець у порівнянні з термопарами зі сплавів W-Re і багато інших. До цієї ж групи варто віднести термопари з електродами з різних модифікацій вуглецю, графіту, карбідів, боридів і силіцидів тугоплавких металів.

Термопари, які широко використовуються у промисловості і при проведенні наукових досліджень, зручно класифікувати відповідно до хімічного складу використовуваних термоелектродних матеріалів. Для високотемпературних термопар така класифікація одночасно відповідає зразковому розподілу термопар за максимальною температурою експлуатації. Відповідно до такої класифікації термопари розташовані у додатках 1 і 2.

Велика кількість найбільш поширених термопар і відповідні термоелектродні сплави (мідь–константан, залізо–константан, платиноводій (10% Rh)–платина, хромель–алюмель, вольфрам–молібден і ін.) були розроблені ще наприкінці XIX — початку XX століття. Наприкінці 30-х рр. були запропоновані термопари зі сплавів іридію з родієм і термопари з електродами з вмістом паладію у сплаві. Наприкінці 50-х — початку 60-х рр. міцно увійшли в промислову практику термопари платиноводій (30% Rh) — платиноводій (6% Rh) і термопари з вольфрам ренієвих сплавів. У цей же час з'явилися різноманітні модифікації хромель–алюмелевої термопари з підвищеною жаростійкістю і ресурсом роботи, а також термопари для виміру низьких температур з електродами із сплавів золота.

За останні десятиліття термоелектродні матеріали для промислових термопар безупинно удосконалювалися. Поліпшувалася відтворюваність і однорідність т.е.р.с, причому в такому ступені, що стало можливим

серійне (масове) виробництво термоелектродного дроту з заданими допусками на т.е.р.с; градувальні таблиці термопар уточнювалися і приводилися у відповідність із існуючими міжнародними температурними шкалами (МТШ-27; МТШ-48, МТШ-68 та МТШ-90).

Термопари зі сплавів нових композицій, розроблені за останні 40–60 років, знайшли широке застосування тільки в тих випадках, коли їх градувальні характеристики збігалися з уже відомими (модифікації термопари хромель — алюмель, платинель). Якщо ж температурна залежність т.е.р.с. термопар істотно відрізнялася від відомих, тобто для них було потрібно створення власного парку вторинних приладів, то область поширення термопар була значно менше, незважаючи на їхні безсумнівні переваги (термопари жеминоль, ЦНИИЧМ-2, нихросил-нисил, фенікс і ін.).

Термоперетворювачі

Для інтервалу температур $-260...+1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ створено параметричний ряд уніфікованих термоперетворювачів, вони мають підвищену точність[1]. Надійність регламентованою стабільністю на протязі усього ресурсу(до 40 000 годин.). Їх відмінна здібність — використання єдиної системи конструктивів та створення на їхній основі базових моделей. Достатня кількість модифікацій дозволяє вимірювати температуру різноманітних об'єктів у відмінних умовах у більшості галузей народного господарства. Перетворювачі розглянутого ряду забезпечують вимірювання в агресивних і неагресивних середовищах, при високому тиску (до 50 МПа) та швидкостях вимірюваного середовища при температурі навколишнього середовища $-50...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$, відносній вологості 30...98%. Параметричний ряд включає:

- 1) перетворювачі термоелектричні хромель-алюмелеві (ТХА-0179, ТХА-0279, ТХА-0279-01, ТХА-0279-02);
- 2) перетворювачі термоелектричні хромель-копелеві (ТХК-0179, ТХК-0279 ТХК-0279-01, ТХК-0379-01, ТХК-0379-03, ТХК-0379-04, ТХК-0479, ТХК-0579), призначені для вимірювання газоподібних, рідких, хімічно неагресивних, а також агресивних, не руйнуючих захисну арматуру середовищ та и твердих тіл від -50 до $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТХА) та до $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТХК);
- 3) перетворювачі термоелектричні платинородієві (ТПП-0679, ТПП-0679-01, ТПП-0679-01, ТПП-0779), призначені для вимірювання температури окислювальних та нейтральних середовищ, повітря, інертних газів, водню, окису вуглецю в діапазонах $300...1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТПР) та $0...1300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ТПП).

Занурюємі термоелектричні перетворювачі, призначені для вимірювання температури газоподібних і рідких неагресивних, а також агресивних середовищ, які не руйнують захисну арматуру. Конструктивні форми цих термоперетворювачів різноманітні, але виконані на єдиній конструктивній базі і входять до складу засобів державної системи приладів. Зовнішня арматура термоперетворювача складається із захисної труби, рухомого чи нерухомого штуцера фланця для кріплення термоперетворювача і головки. У головці міститься контактна колодка з затисками для приєднання проводів, що з'єднують термоперетворювач з вимірювальним приладом. Введення проводів у голівку ущільнюється сальником. У термоперетворювачах без голівки проводять спеціальне закладення вивідних кінців. Кріплення термоперетворювачів на об'єктах здійснюють за допомогою штуцера, фланця, приваркою, приклеюванням та ін. Термоелектричні перетворювачі випускають одинарні і подвійні з різною довжиною занурення, одно- і багатозонні. Довжина частини, що занурюється, визначається при кріпленні нерухомим штуцером (фланцем) як відстань від кінця гарячого спаю до опорної площини штуцера (фланця), при кріпленні рухливим штуцером (фланцем) — як відстань від робочого спаю до головки, а при відсутності головки — до місця закладення виводів. По довжині частини, що занурюється, більше 500 мм і установці термоперетворювача в горизонтальному чи похилому положенні передбачається додаткове кріплення.

При вимірюванні температури середовищ з високим тиском і великою швидкістю потоку термоперетворювачі комплектують захисними (монтажними) гільзами.

Термоперетворювачі для вимірювання температури поверхні

Вимірювання температури поверхні пов'язано зі складними явищами, що виникають при теплообміні між чуттєвим елементом, об'єктом виміру (поверхнею) і навколишнім середовищем. Поверхня твердого тіла являє собою границю розділу двох середовищ з різко відмінними тепловими властивостями. При цьому поблизу поверхні звичайно виникають великі градієнти температур, що істотно утрудняє точність вимірювань. Термоприймач одним боком дотикається поверхні, температуру якої необхідно вимірити, а з інших боків підпадає під вплив оточуючого середовища, тепловий вплив якого неминуче викривляє результат вимірювань. Тому чим більше різниця температур поверхні та навколишнього середовища, тим більше похибка вимірів. У промисловій практиці доводиться

вимірювати температуру на поверхні різних геометричних форм, стаціонарних та тіл обертання, металів та ізоляторів, з високою та низькою теплопровідністю, рівних та шорстких. Для цього існують термоперетворювачі різних конструкцій.

Для вимірювання температури (до 300 °С) поверхні масивних тіл з магнітної сталі можна використовувати термоперетворювач ТХК-0382 (рис. 2.4) [1].

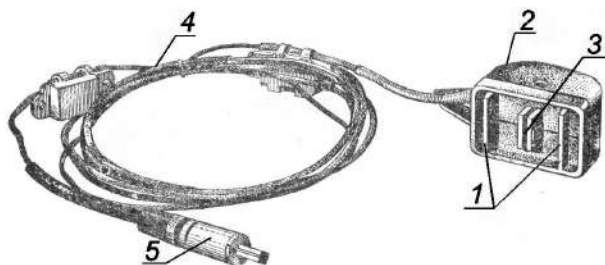


Рис. 2.4. Термоперетворювач ТХК-0382 для вимірювання температури з магнітним кріпленням: 1 – магніт; 2 – кожух; 3 – стрічкова термopapa; 4 – кабель; 5 – роз'єм.

Для експрес-контролю температури нагрітих металевих заготовель та інструменту до 900 °С розроблено термоперетворювач на основі стрічкової термopapi хромель-алюмель.

Термоперетворювачі для вимірювання температури розплавлених металів

У зв'язку з відсутністю матеріалів, тривалий час працюючих в розплавлених металах, використовують спеціальні конструкції для короткочасного вимірювання (близько кількох секунд) температури розплавленого металу. Періодичне вимірювання його температури здійснюють зануренням захищеного робочого кінця перетворювача в ванну з металом на глибину 70...100 мм, відрахуванням встановленого показу вимірювального приладу та витяганням перетворювача з ванни. Мала інерційність перетворювача при такій послідовності вимірювального процесу призводить до того, що тривалість перебування термоперетворювача в рідкому металі складає зазвичай кілька десятків секунд. Тому агресивна дія рідкого металу на матеріал захисного ковпачка зводиться до мінімуму, а строк служби перетворювача подовжується.

Промисловість серійно випускає термоперетворювачі типу ТПР-1408М, ТПР-1418 М, ТХА-1358, ТПР-0475, ТПР-2075, ТВР-301-01, ТПР-2085, ТВР-2085 та ін.

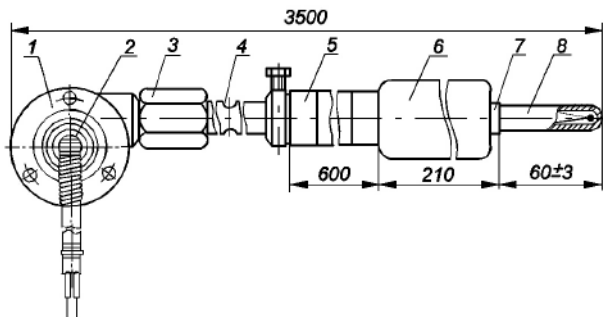


Рис. 2.5. Перетворювач термоелектричний ТПР-1408М[1]: 1 — головка складена; 2 — колодка складена; 3 — накидна гайка; 4 — арматура складена; 5 — графітова втулка; 6 — графітовий блок; 7 — графітова пробка; 8 — кварцевий наконечник.

Термоперетворювач ТПР-1408М складається з головки 1, в яку поміщена котушка з запасом термоелектронного дроту із сплавів ПР-30 та ПР-6 довжиною по 25 м та діаметром 0,5 мм (загальна маса дорогоцінного металу 187,42 г.), арматури 4, з графітовим блоком 5 та кварцового наконечника 8, який захищає гарячий спай термопари від безпосереднього контакту з розплавленим металом. Кварцевий наконечник замінюють після кожного занурення, тривалість якого не повинна перевищувати 20 с. Робочий спай термопари обновлюють через 3...4 виміру, відрізаючи від електродів 40...70 мм залежно від крихкості останніх.

Графітові втулки та пробки, а також і металеві втулки замінюють у міру необхідності, не допускаючи їх повного руйнування.

Проте термоперетворювачі такого типу мають суттєві недоліки:

- 1) за час вимірювання в платинородієвій термопарі відбуваються значні фізико-хімічні перетворення й накопичуються термонапруження, що призводить до зміни механічних властивостей та погіршення точності вимірів;
- 2) спостерігаються значні втрати дорогоцінних металів, у середньому 2% вимірювань завершуються втратою робочого кінця довжиною 100 мм, що складає близько 0,7 г. платинородієвих сплавів; річні їх втрати на електродугову піч складають 360 г;
- 3) трудомісткість процесу вимірювання.

У міру вдосконалення технологічних процесів та освоєння нових марок сталі зростають вимоги до точності вимірювання температури у ванні сталеплавильної печі, при випусканні високоякісних сталей не допускається більше ніж $\pm 10^\circ\text{C}$, а на установках безперервного розливання сталі $\pm 5^\circ\text{C}$. Підвищились температури металургійних процесів. Плавлення сталі у конверторах відбувається при 1600 та 1800°C , а при плавленні нержавіючих сталей у дугових печах з наступним піддуванням кисню на останній стадії окислення температура досягає $1800...2000^\circ\text{C}$.

Для надійного та оперативного контролю температури розплавленої сталі широко використовують термоелектричні перетворювачі зі змінними вимірювальними пакетами. Конструктори називають їх по-різному: блок, термозонд, датчик, пакет.

Основна частина перетворювача — вимірювальна головка, де у кварцевій трубці знаходиться термопара з термоелектродів діаметром 0,07...0,2 мм.

Матеріали головки, її конструкція та якість збирання визначають метрологічні характеристики та надійність перетворювача. Вимірювальна головка вмонтована у паперову гільзу. Принципова схема вимірювання температури термометрами з такими первинними перетворювачами показана на рис. 2.6[1].

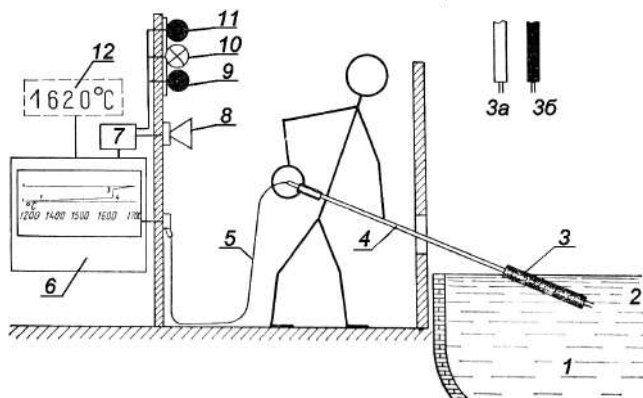


Рис. 2.6. Принципова схема вимірювання температури рідкого металу термоперетворювачем зі змінним пакетом

У розплавлену сталь 1, покриту шлаком 2, занурюють змінний пакет 3 термоелектричного перетворювача 4. Сигнал від термопари через кабель 5 надходить на самопишучий потенціометр 6. Керуючий сигнальний пристрій 7, в якому розміщено реле часу, за допомогою світлофора повідомляє

про наявність ланцюгу та готовність термоперетворювача до вимірювання (зелений сигнал 9); під час вимірювання (5...7 с) горить жовтий сигнал 10 світлофора; про те, що вимірювання завершено та пакет слід витягати з розплаву, сигналізує червоне світло 11 або сигнал 8. Самозаписуючий потенціометр зазвичай розміщують у пультовій. Цифрове табло 12 та світлофор винесені на площадку з таким розрахунком, щоб вони знаходились у полі зору оператора, який проводить виміри. Оскільки процес вимірювання простий та не потребує спеціальної технічної підготовки, його зазвичай проводять сталевари.

Конструкції вимірювальних головок постійно вдосконалюються з метою підвищення точності, надійності вимірів, зменшення їхньої коштовності. При виплавці сталей спеціальних марок температура у дуговій печі досягає 2100 °С. Вимірювання таких високих температур можуть забезпечити термопары вольфрам-молібден та вольфрам-реній.

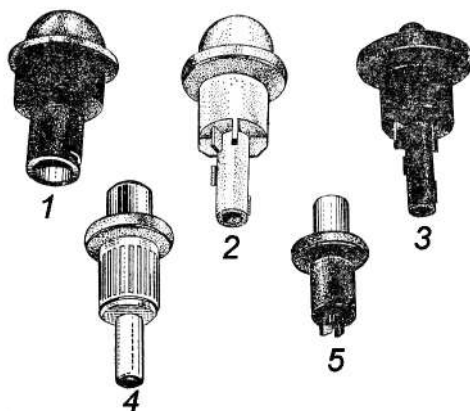


Рис. 2.7. Вимірювальні змінні головки термоперетворювачів для вимірювання температури розплавлених металів, які виготовляють різні виробники[1]: 1 — «Сименс» (ФРН); 2 — «МЕСІ» (Франція); 3 — «Електротермометрія» (Україна); 4 — «Демаг» (ФРН); 5 — «Електронайт» (США, Бельгія)

Кабельні термопары та термоперетворювачі

Перспективною є технологія виготовлення термоперетворювачів у вигляді термопарних кабелів (так звані броньовані оболонкові або кабельні термопары). З чистих порошків електроізоляційних матеріалів методом сухого пресування виготовляють двоканальні буси, в які вставляють підготовлені термоелектроди. Ізольована термопара затягується в металеву

трубку та волочінням (якщо необхідно, то з відпалом) отримують готовий виріб. Кабельні термоперетворювачі випускають довжиною до 400 м (з термopарами з неблагородних металів) та до 10 м (з платино-родієвими термopарами) в якості захисної арматури використовують корозійностійку сталь 08X18H10T (до 850 °C), у ФРН, Франції, США залежно від робочої температури використовують інконель (72% Ni, 14–17% Cr, 6...10% Fe, < 10% Mn) до 1300 °C, ніобій, тантал, молібден та інші матеріали. Засипку проводять порошкоподібними оксидами магнію, алюмінію, в деяких випадках — оксидами цирконію, торію, берилію. Кабелі випускають дво або чотирижильні діаметром від 0,15 до 8 мм, з ізолюванням або неізолюванням робочим спаєм.

Термоперетворювачі на базі термopарного кабелю мають суттєву перевагу у порівнянні з термоперетворювачами звичайної конструкції: високою надійністю; стабільністю метрологічних характеристик, універсальністю застосування в різних умовах експлуатації, малою інерційністю, гарною технологічністю, малими матеріаломісткістю та трудомісткістю. Великою перевагою також є те, що у процесі монтажу їх можна вигибати, укласти у важкодоступних місцях, приварювати, припаювати або просто притискати до поверхонь при вимірюванні температури до 800 °C, до того ж вони здатні працювати в умовах високого тиску.

Кабельні термopари широко використовують у нафтопереробній та хімічній промисловості: при виробництві бензину, переробці нафти; синтезі вуглеводневих газів, аміаку, генераторного газу, виробництві метанолу та іншого; у металургії та атомній енергетиці.

2.6. Вторинні електричні прилади для вимірювання температури

Класифікація і конструкції вторинних приладів (ВП)

Можливість перетворення температури в електричні величини дозволяє здійснювати відлік її значень за допомогою вторинних електричних приладів (ВП). Електричними величинами, безпосередньо пов'язаними з температурою, є т.е.р.с. перетворювача термометричного та опір термоперетворювача опору. У загальному випадку прилади для вимірювання температури включають в себе первинний перетворювач та ВП. Вони можуть бути побудовані за схемою прямого або врівноважуючого перетворювачів.

Схема врівноважуючого перетворення (з ланцюгом загального зворотного зв'язку) внаслідок складності, а частіше неможливості створення

простих і надійних зворотних перетворювачів електричної величини в температуру, не знайшла застосування. Тому вимір температури здійснюється системою, що включає послідовне з'єднання за допомогою лінії зв'язку первинного перетворювача і ВП. При цьому ВП проградуйовані з урахуванням функції перетворення первинного перетворювача в одиницях вимірюваної температури.

Відмінною рисою ВП для виміру температури є те, що вони працюють із сигналами низького рівня й у них повинна бути передбачена автоматична корекція впливу неінформативних параметрів, що впливають на первинний перетворювач, лінію зв'язку і на сам ВП. До складу останніх входять вузли узгодження первинного перетворювача з вимірювальною схемою, що роблять функції посилення, нормування, лінеаризації, корекції динамічних характеристик первинних перетворювачів, фільтрації перешкод і т.п. Так, узгодження динаміки об'єкта виміру і первинного перетворювача не завжди можна забезпечити конструктивним шляхом; поліпшення динамічних характеристик перетворювача призводить до погіршення статичних характеристик і зниженню надійності. У таких випадках ВП містять вузли корекції динамічних характеристик, вибір оптимальних параметрів яких повинен вироблятися з урахуванням того, що їхня наявність приводить до зростання впливу дестабілізуючих факторів, у першу чергу, перешкод.

Структури ВП визначаються можливостями застосування визначеного типу первинного перетворювача, похибкою виміру, швидкодією, необхідністю автоматичної реєстрації й обробки інформації, умовами експлуатації.

Як ВП, що працюють у комплекті з ПТ (перетворювач термоелектричний), найчастіше використовуються мілівольтметри і потенціометри постійного струму, а з ТО — феродинамічні чи магнітоелектричні логометри, мости і потенціометри. Для ТО (термоперетворювач опору) і ПТ випускаються безшкальні перетворювачі з уніфікованим аналоговим вихідним сигналом і цифрові прилади.

Найбільш досконалими приладами для виміру температури є автоматичні мости і слідкувальні потенціометри зрівноважувального перетворення та цифрові прилади[1]. Прилади з ручним зрівноваженням використовуються в основному для дослідницьких цілей, у лабораторній практиці і при метрологічних роботах. Прилади прямого перетворення — мілівольтметри і логометри — використовуються у випадках, обумовлених простотою експлуатації і відсутністю високих вимог до точності вимірювань.

Автоматичні мости і потенціометри уніфіковані за конструктивним виконанням і формою подання вимірювальної інформації. Вони підрозділяються на показуючі і комбіновані (показуючі і самописні). Показуючі розрізняють: із круглою шкалою й обертовою стрілкою, з обертовим циферблатом барабанного типу і нерухомою стрілкою і з прямолінійною шкалою і лінійним переміщенням стрілки. Самописні прилади мають стрічкову чи дискову діаграми. Вони мають такі позначення: КС — із записом на стрічковій діаграмі; КП — показуючі з плоскою шкалою; КВ — показуючі з обертовою шкалою. Прилади КС, КП, КВ залежно від принципів дії розділяються на: 1) прилади з мостовою вимірювальною схемою — КСМ, КПМ, КВМ; 2) прилади з потенціометричною вимірювальною схемою — КСП, КПП, КВП; 3) прилади для вимірювання уніфікованих сигналів вимірювальних перетворювачів ГСП: КСУ, КВУ, КПУ; 4) прилади з логометричною вимірювальною схемою — КСЛ.

Крім показів по шкалі і запису на діаграму прилади всіх типів можуть забезпечуватися додатковими вихідними пристроями для передачі інформації у вигляді електричного чи пневматичного сигналу для зв'язку з засобами ДСП (Державної системи приладів).

За кількістю точок вимірів розрізняють прилади одноточкові і багато точкові. Показуючі багатоточкові прилади оснащуються ручними перемикачами кнопочного типу. Самописні багатоточкові прилади мають систему автоматичного опитування точок із заданою періодичністю. Залежно від габаритних розмірів прилади розділені на: 1) мініатюрні — КС1 (КСП1, КСМ1) (ширина полю для запису і довжина шкали 100 мм, габаритні розміри 160 X 200 X 492 мм); 2) малогабаритні — КС2, КСП2, КСМ2, КСУ2) (ширина полю для запису і довжина шкали 160 мм, габаритні розміри 240 X 320 X 492 мм); 3) нормально габаритні — КС4 (КСП4, КСМ4, КСУ4) (ширина полю для запису і довжина шкали 250 мм, габаритні розміри 400 X 400 X 367 мм); 4) показуючі прилади, з обертовою шкалою — КВ1 (КВП1, КВМ1, КВУ1) (довжина шкали 500 мм, габаритні розміри 160 X 240 X 470 мм); 5) прилади, що показують, із плоскою шкалою — КП1 (КПМ1, КПП1, КПУ1) (довжина шкали 195 мм, габаритні розміри 160 X 200 X 500 мм); 6) прилади з дисковою діаграмою — КС3 (КСП3, КСМ3, КСУ3) (довжина шкали 600 мм, габаритні розміри 320 X 320 X 400 мм).

Швидкість руху діаграми запису в самописних приладах може змінюватися в широких межах, що забезпечує можливість реєстрації температурних процесів з різною швидкістю протікання. У багатоточкових приладах здійснюється дискретний запис за кожним із каналів із указівкою його

номера. Реєстрація показів цифрових приладів здійснюється перфоруючими цифродрукуючими пристроями або може безпосередньо вводитися в обчислювальні машини для централізованого керування технологічними процесами. Конструктивне виконання автоматичних мостів і потенціометрів базується на блочно-модульному принципі будови, що забезпечує технологічність виготовлення і зручність експлуатації.

Промисловістю випускаються також мініатюрні мости і потенціометри спеціального конструктивного виконання, призначені для експлуатації в умовах підвищених кліматичних і механічних впливів. У металургії використовуються автоматичні показуючі і самописні мости типу МФС,

МФП і потенціометри ЕПС, ЕПП; на транспорті — показуючі мости, КМ 140 і потенціометри КП140. Зовнішній вигляд автоматичних мостів і потенціометрів наведений на рис. 2.8. Рекомендації з монтажу приладів на щитах і пультах керування даються в технічній документації на прилади.

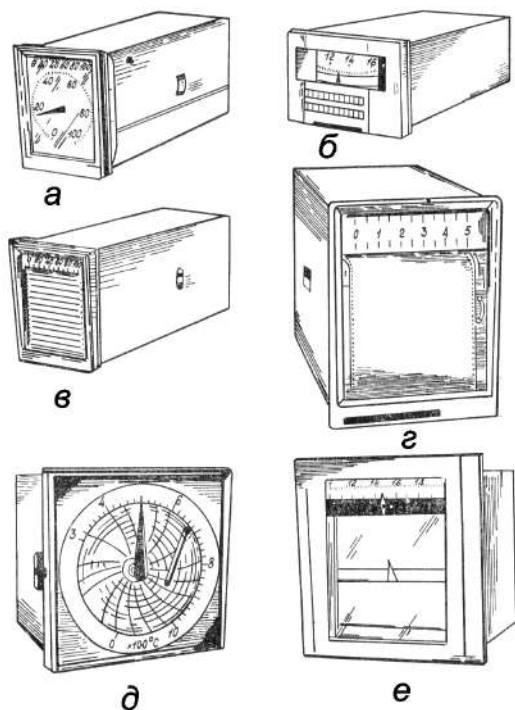


Рис. 2.8. Електронні автоматичні мости та потенціометри[1]: а — КП1; б — КВ1; в — КС1; г — КС2; д — КС3; е — КС4

Мілівольметри, логометри, уніфіковані перетворювачі і цифрові прилади внаслідок особливостей їхньої побудови не мають загального конструктивного вигляду. Вони об'єднані за типами, обумовленими вимірювальною схемою. Різноманіття моделей ВП забезпечує можливість робити вимірювання температури у всьому діапазоні застосування контактних термоперетворювачів. При виборі ВП крім необхідної точності, діапазону вимірюваних температур, кількості каналів, необхідності реєстрації і регулювання необхідно особливу увагу приділити можливості зберігати стабільність показів ВП при впливі експлуатаційних факторів.

Вторинні електричні прилади для роботи в комплекті з термоелектричним перетворювачем. Особливості вимірювань т.е.р.с. ПТ (перетворювачем термометричним). Вимір температури за допомогою ПТ здійснюється шляхом перетворення її в пропорційну е.р.с., що вимірюється за допомогою ВП. Значення т.е.р.с. залежить від різниці температур робочих і неробочих (вільних) кінців ПТ. Ця особливість визначає специфічність схем підключення ПТ до ВП. З економічних і конструктивних міркувань ПТ повинний бути як можна коротше. Тому поблизу точки вимірювання температури (звичайно у головці захисної арматури ПТ) підключаються термоелектродні подовжувальні проводи. До останніх висуваються менш жорсткі вимоги, ніж до термоелектродів ПТ, тому що на них не в такому ступені впливає середовище, температура якого вимірюється. Термоелектродні проводи у діапазоні температур, обумовлених температурою головки ПТ і температурою експлуатації ВП, повинні розвивати таку ж т.е.р.с., як і ПТ, до якого вони підключаються. Другі кінці термоелектродних проводів через пристрої компенсації (чи стабілізації) змін температури «подовженого» ПТ підключаються до ВП. На рис. 2.9 подані основні схеми підключення ПТ. У найбільш простій схемі (рис. 2.9, а) при безпосереднім підключенні термоелектродів до ВП вільні кінці знаходяться при температурі навколишнього середовища і її зміни впливають на результат виміру. У схемі (рис. 2.9, б) повинне бути передбачене окреме місце з постійною і відомою температурою t_0 , в якому з'єднуються подовжувальні і мідні проводи, що підключаються до ВП. При лабораторних вимірах температуру вільних кінців t_0 краще підтримувати 0 °С. В інших випадках необхідно вводити виправлення до показань ВП на величину, обумовлену відмінністю температури вільних кінців від 0°С, оскільки номінальні статичні характеристики ПТ відомі для температури вільних кінців, що дорівнює 0 °С.

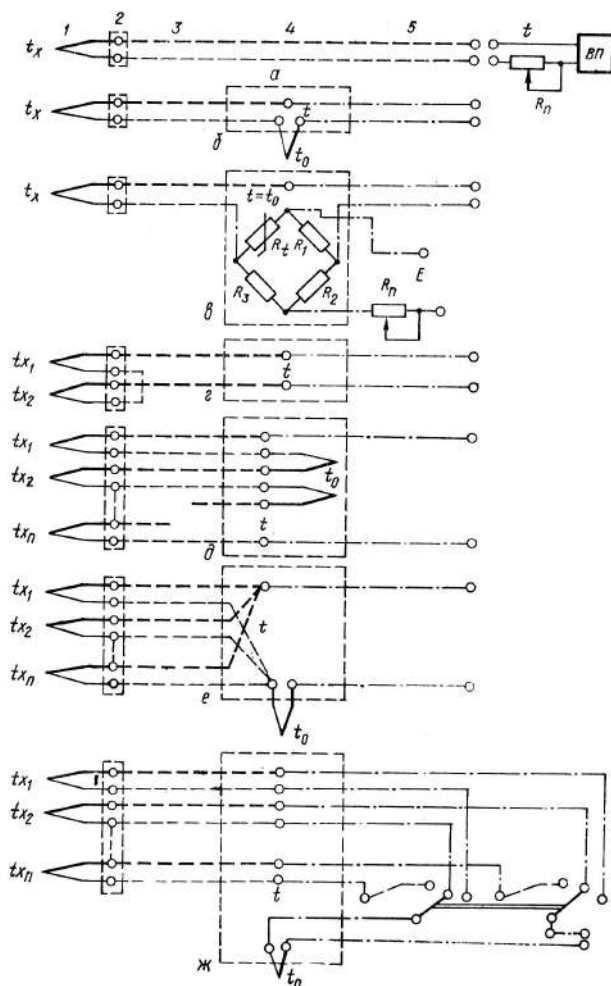


Рис. 2.9. Схеми включення ПТ (перетворювача термометричного) [1]: а — компенсації на температуру вільних кінців; б — з використанням термостатування вільних кінців; в — автоматична компенсація температури вільних кінців; г — для виміру різниці температур; д — послідовне включення (термобатарея); е — рівнобіжне (паралельне) включення; ж — комутація точок виміру; 1 — ПТ (перетворювач термометричний); 2 — місце підключення термоелектродів до подовжувачих дротів; 3 — подовжувальні проводи; 4 — місце вільних кінців подовжувальних проводів; 5 — мідні проводи; t_x , t_0 , t — температури відповідно вимірювана, відома і навколишнього середовища.

При промислових вимірах застосовується спосіб підключення ПТ із корекцією впливу змін температури вільних кінців (рис. 2.9, *в*). У цьому випадку температура вільних кінців може приймати випадкові значення, що вимірюються термометром опору. Напруга, що утвориться при цьому, $U_{аб}$ залежить від t і складається з е.р.с. ПТ. У схему корекції входить міст, в одне з пліч якого включений термозалежний резистор R_t (мідний чи нікелевий), що знаходиться в однакових температурних умовах з вільними кінцями ПТ. Міст живиться стабілізованим джерелом, а його параметри обрані такими, щоб при температурі $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ напруга $U_{аб} = 0$. Промисловістю випускаються пристрої корекції різних модифікацій для всіх стандартних ПТ. У діапазоні зміни температури t вихідна напруга моста повинна відтворювати функцію, аналогічну статичній характеристиці використовуваного ПТ. Унаслідок нелінійності характеристик ПТ повної корекції похибок за допомогою цієї схеми досягти не вдається. Для підвищення точності, особливо в широкому діапазоні змін температури t , використовують міст із двома термочутливими резисторами.

На рис. 2.9, *г, д, е, ж* наведені схеми підключення ПТ для вимірювання різниці температур (зустрічне включення), збільшення вимірюваної е.р.с. (послідовне включення), виміру декількох температур одним ВП. В усіх схемах необхідно забезпечити рівність температур клем підключення подовжувальних проводів. Корекція змін температури вільних кінців може здійснюватися і за допомогою термочутливого моста, як на рис. 2.9, *чи у схемі ВП*.

Необхідність виміру власне е.р.с. ПТ приводить до впливу на результат виміру опорів термоелектродів ПТ і подовжувальних проводів, а також вхідного опору ВП.

Оскільки ПТ мають низькі рівні т.е.р.с., це викликає необхідність у високочутливих ВП, що при значних, як правило, відстанях від вимірюваного об'єкта накладає вимоги на забезпечення перешкодостійкості виміру. Як ВП використовуються мілівольтметри, потенціометри (автоматичні і з ручним врівноваженням), нормуючі перетворювачі і цифрові прилади.

Мілівольтметри. Принцип дії мілівольтметра заснований на взаємодії струму, що протікає через рухливу рамку приладу з великою кількістю витків тонкого проводу, з магнітним полем постійного магніту. Рамка жорстко скріплена зі стрілкою й утворює рухливу систему мілівольтметра, що повертається навколо осі. У приладах високої чутливості замість стрілки встановлюється дзеркало для світлового показника кута повороту.

Для зменшення впливу температури навколишнього повітря на показання приладу послідовно з ним включається додатковий резистор з манганіну. У ряді приладів послідовно з резистором включають термістор таким чином, щоб у діапазоні температур експлуатації приладу їхній сумарний опір був постійним.

За рахунок споживання струму мілівольтметром на опорах зовнішнього ланцюга утвориться падіння напруги, і до входу мілівольтметра прикладається напруга

$$U = IR_{\text{MB}} = E(T, 0) R_{\text{MB}} / (R_{\text{MB}} + R_{\text{BH}}) \quad (2.17)$$

де I — струм у ланцюзі; R_{MB} — внутрішній опір мілівольтметра; $E(T, 0)$ — електрорушійна сила ПТ; $R_{\text{з}}$ — опір зовнішнього ланцюга, куди входять опір ПТ, подовжувальних і сполучних проводів, пристроїв компенсації. Для зменшення методичної похибки опір зовнішнього ланцюга за допомогою перемінного резистора підганяють до значень 5 чи 15 Ом безпосередньо при монтажі приладу. При цьому похибка визначається лише зміною опорів зовнішнього ланцюга. Корекція змін температури вільних кінців ПТ здійснюється в основному з використанням пристроїв, що включаються за схемою рис. 2.9, в.

Мілівольтметри випускаються показуючі і регулюючі, за конструктивним виконанням — щитові і переносні. Для переносних приладів установлені класи точності 0,2; 0,5; 1,0, для щитових — 0,5; 1,0; 1,5; 2,0. Межі виміру мілівольтметра визначаються типом застосовуваного ПТ. На його шкалі вказується номінальне значення опору зовнішньої лінії і градуювання ПТ, у комплекті з яким працює цей мілівольтметр.

Контрольні запитання.

1. Який з трьох термоелектричних ефектів: Зеебека, Пельтьє і Томсона використовують для вимірювання температури?
2. У чому сутність закону однорідного ланцюга (закон Магнуса)?
3. У чому сутність закону проміжних металів?
4. У чому сутність закону послідовних, або проміжних температур?
5. Наведіть схему термоелектричного термометра.
6. Які основні вимоги висувають до термоелектронних сплавів?
7. На які типи підрозділяються термоперетворювачі?
8. Наведіть основні типи термопар для вимірювання високих температур?

9. Наведіть основні типи термопар для вимірювання низьких температур?
10. У чому полягає відмінність термоперетворювачів від термопар?
11. Термоперетворювачі для вимірювання температури поверхні та розплавлених металів.
12. Що таке кабельні термопари та галузі їх використання?
13. Класифікація і конструкції вторинних приладів для вимірювання температури.
14. Які ви знаєте схеми включення термопар?
15. Які ви знаєте вторинні електричні прилади для роботи у комплекті з термоелектричним перетворювачем?
16. Наведіть види мілівольтметрів та вкажіть принципи їх дії?

Лекція 3.

Контроль температури виробничих процесів за допомогою рідинно-скляних термометрів

ПЛАН.

- 3.1. *Термометричне скло та термометричні рідини для рідинних скляних термометрів.*
- 3.2. *Шкали, чутливості, похибки рідинних скляних термометрів.*
- 3.3. *Рідинні скляні термометри, які випускаються промисловістю та спеціального призначення.*

3.1. Термометричне скло та термометричні рідини для рідинних скляних термометрів

Рухливість молекул, а відповідно, інтенсивність об'ємного й термічного розширення у рідин значно більше, ніж у твердих речовин. Тому рідина, що заповнює твердотілий посуд, з ростом температури є у надлишку, а при зменшенні — у нестачі. Це явище й є принципом дії всіх РСТ (рідинні скляні термометри). Конструктивна схема РСТ включає резервуар, в якому міститься термометрична рідина, та приєднаний до нього капіляр, що частково заповнений надлишковою рідиною. За висотою стовпчика рідини у капілярі аналізують вимірювану температуру резервуара за допомогою шкали, яку наносять або прямо на скло капіляра, або на спеціальну пластинку, яку міцно, але еластично з'єднують з капіляром. Історично, РСТ були першими термометрами, які набули широкого поширення. Такі їх переваги, як простота у використанні, невибагливість, постійність характеристик забезпечили широке поширення для вимірювань в діапазоні від — 200 до 1 200 °С. Використання ртуті відкрило можливість створення неокислюваних електричних контактів, що привело до широкого використання ртутних термоконтактних пристроїв у системах контролю та регулювання.

Недоліки РСТ обумовлені труднощами безперервного сполучення їх з електричними системами подальшої переробки первинної інформації, тому в деяких галузях народного господарства РСТ витісняються термоелектричними та резистивними термометрами.

Термометри виготовляють зі спеціального термометричного скла, яке має мінімальну термічну післядію, що визиває тимчасове пониження показань термометра (депресія точки нуля) та мало схильного до старіння,

тобто зменшення об'єму в залежно від часу та температури. Загальні вимоги до готового скла, що йде на виготовлення РСТ, нормовані згідно ГОСТ 1224–71.

Термометричне скло поділяють на три класи[9]:

- 1) висококремнеземисте; кварцеве, викор;
- 2) боросилікатне; лужне та нелужне;
- 3) свинцевосилікатне.

Стандартом передбачені такі марки термометричного скла: 360, 500, 650. Цифрове позначення марки скла відповідає верхній межі шкали РСТ (°C). Для вимірювання більш високих температур використовують плавлений кварц. Хімічна стійкість термометричного скла повинна бути високою, так, в умовах, нормованих ГОСТ 21400–75, втрати маси у лужному середовищі не повинні перевищувати $1,5\text{--}2\text{ мг/см}^2$, в кислий — $0,01\text{...}0,15\text{ мг/см}^2$. При виготовленні скло не повинно втрачати міцності та кристалізуватися.

Старіння скла

Після складовної обробки у виробках виникають та зберігаються достатньо великі внутрішні напруження, релаксація яких з часом приводить до зміни розмірів. В усьому діапазоні температур скло залишається високопластичною масою. Отриманий роздуванням виріб прагне до скорочення, що приводить до необумовленого збільшення показань, яке починаючи від 1.5 K на рік, регулярно скорочується. Для зменшення цього явища при виготовленні проводять штучне старіння. Тим не менш протягом першого року відбувається зростання показань на $(2\text{...}5)10^{-2}\text{ K}$. У подальшому процес затухає, проте про нього слід пам'ятати при використанні старих РСТ.

Депресія скла

Депресія скла обумовлена їх схильністю до невеликого гістерезису лінійних розмірів при швидкій зміні температури. Розмірів, які відповідають новій температурі, що встановилась, виріб набуває тільки через 15–30 годин. Явище у різному ступені властиве всім сортам скла, які застосовують для виготовлення РСТ.

Депресія залежить від складу скла, причому підвищеній кількості солей калію і натрію у рівних долях відповідає підвищена депресія. Наявність тільки одного із зазначених компонентів не сприяє підвищенню депресії. Для старих термометрів депресія після нагрівання до 500 °C досягає 0,6 K.

Нормована перевірка на депресію звичайно проводиться після зміни хімічного складу в скловарній ванні. Для цього з випробуваного скла

виготовляється не менше 10 спеціальних термометрів з ціною поділки не більше 0,02 K, інтервалом робочих температур ± 1 °C, конструкція яких дозволяє робити нагрівання до 100 °C. Попередньо витримані у танучому льоді і промиті у дистильованій воді термометри встановлюють у колодязь приладу потрібної точки води, залитий дистильованою водою так, щоб нульова точка була на 4...5 мм вище рівня води. Після витримки протягом 10 хв за допомогою катетометра реєструється положення потрібної точки на шкалі кожного термометра не менше трьох разів з інтервалом 1 хв. Потім термометри витримують в окропі 100 ± 3 °C протягом години, охолоджують до кімнатної температури і повторюють вимірювання у приладі потрібної точки води. Припустима депресія складає 0,05 K для скла марки 360; 0,05 K для скла марки 500; 0,01 K для скла марки 650. Нормована депресія для старого скла така: ієнське термометричне 16111–0,04 K; боросилікатне 59111–0,03 K; верредур — 0,11 K; супермакс 1565111–0,01 K.

Практика й аналіз дійсних і припустимих похибок вимірювання показують, що при вимірах температур вище 100 °C неможливо враховувати депресію стекол. Створити методику внесення точного виправлення на депресію у вимірах дуже важко; очевидно, її варто враховувати при аналізованні окремих складових похибки вимірювання.

Термометричні рідини для РСТ

Ртуть серед термометричних рідин має найбільш широке поширення. Її властивості регламентовані ГОСТ 4658–73. Для виготовлення термометрів застосовують ртуть марок Р1 і Р2, яким відповідають кількості домішок, що складають нелетучий залишок, не більше 0,001 і 0,01% відповідно. З [1] відомо, що нелінійність залежності щільності від температури росте з підвищенням останньої, але її відносне значення невелике, навіть при 300 °C не лінійність у залежності щільності від температури не перевищує 3%. Цим ртуть вигідно відрізняється від усіх інших термометричних рідин. При використанні чистої ртуті, яка твердіє при $-38,84$ °C, нижня межа вимірів -30 °C (зрідка -35 °C).

Евтектичні сплави ртуті з металами третьої групи (In, Ga, Tl) мають більш низькі температури затвердіння. Так, запропонований ще на початку ХХ в. Н. С. Курнаковим евтектичний сплав ртуті з талієм (8,5% Tl) твердне при температурі нижче -60 °C. Додаток спеціальних лігатур дозволяє виготовляти термометри з металевим заповненням для вимірювань температур від -90 °C. Ртуть і її лігатури дуже отрутні. Отруєння відбувається головним чином парами ртуті через органи дихання і може носити гострий

і хронічний характер. При експлуатації і зберіганні ртутних РСТ необхідно контролювати випадки їх биття і вживати заходів з усунення умов отруєння. Гранично допустима концентрація парів ртуті у приміщенні дорівнює 0,01 мг/м³. Органічні рідини значно більш чутливі до зміни температури: їхній коефіцієнт температурного розширення на порядок вище, ніж у ртуті. Як термометричні рідини широкого застосування набули етиловий спирт, петролейний ефір, гас, толуол і пентан. За своєю природою вони прозорі у видимій частині спектра, що може бути оцінене як перевага, так і як недолік. Для поліпшення умов спостереження у ці рідини додають барвники, найчастіше яскраво-червоні, зі смугою пропущення приблизно 0,65 мкм. Барвник повинен виявляти себе тільки у фарбуванні рідини, всі інші прояви небажані: неприпустимі пряма чи каталітична реакція з основною рідиною, фарбування стінок капіляра, зміна фарбування рідини згодом, випадання осаду і т.п. Прийнятні характеристики одержують при фарбуванні аніліновими барвниками. Конструктивно вдалим представляється рішення, в якому з боку, протилежного спостерігачу, у капіляр додається тонка кольорова смужка. Вона знаходиться в оптичному фокусі циліндричної лінзи, що утворена прозорою рідиною, яка заповнює капіляр, і добре помітна на заповненій ділянці. За порожнім каналом смужка важко помітна неозброєним оком. Аналогічне рішення застосовується й у термометрах із вкладеною шкалою: для поліпшення видимості стовпчика рідини під капіляром на шкалу наноситься чорна смуга. Майже всі термометричні рідини є вогненебезпечними, летучими, вибухонебезпечними та отруйними. Але гранично допустимі їх концентрації у повітрі на 3...5 порядків вище, ніж для ртуті, їх присутність легше розпізнається за запахом, а наслідки не такі сильні, як при отруєнні ртуттю. Тому експлуатація термометрів з органічними рідинами не регламентована спеціальними вимогами техніки безпеки.

Основні характеристики термометричних рідин наведені у табл. 3.1[1].

Таблиця 3.1. — Термометричні рідини

Речовина	β 10–6, К-1	Температура, °С	
		затвердіння	кипіння
Ртуть	182,5	–38,87	356,7
Талієва амальгама	182	–60	360... 1 460
Складна амальгама	180	–90	360...2 000
Галій	55	29,8	2 070

Продовження таблиці 3.1

Речовина	β 10–6, К–1	Температура, °С	
		затвердіння	кипіння
Гас	1 150	–50... –15	200... 290
Пентан	1 550	Нижче –200	30...40
Петролейний ефір	1 220	Нижче –100	40...70
Спирт етиловий	1 100	–111,8... –117,3	77,7...78,4
Спирт метиловий	1 220	–93,9... –97,8	64,2...66,0
Сірковуглець	1 210	–113,0	46,0
Толуол	1 090	–92,4... –102,0	109,2...110,6

3.2. Шкали, чутливості, похибки рідинних скляних термометрів

Шкала термометра встановлює міру відповідності між виступаючим у капілярі стовпчиком та температурою, що вимірюють. Конструкції шкал повинні гарантувати однозначність механічного зв'язку з капіляром та зручність спостереження положення меніска. Поділ шкали повинен спиратись на точні значення температур у фіксованих точках та інтерполяційні формули з урахуванням характеру термічного розширення термометричної рідини та скла. Основні складнощі при діленні шкали пов'язані з нелінійністю властивостей рідин та скла. При рівномірному поділенні шкали в діапазоні 0...100 °С похибка за рахунок поділки не перевищує 0,05 К. Екстраполяційне ділення дає менш надійні результати. Екстраполявання стоградусної шкали на ртутному термометрі із скла 1565¹¹¹ до 700 °С приводить до похибки 75 К. Екстраполяція шкали, основаної на точках танення льоду та сублимації двоокису вуглецю, до температури кипіння азоту для пентанового термометру дає похибку 23 К. У зв'язку з великою надійністю інтерполяції у платинових термометрів опору градуювання проміжних значень шкали проводять за показаннями термометрів опору[1, 9].

Таблиця 3.2. — Межі допустимих похибок показань термометра

Діапазон вимірюємих температур, °С	Ціна поділки шкали, °С							
	0,01	0,02	0,05	0,1 та 0,2	0,5	1	2	5 та 10
–35...0	± 0,05	±0,08	±0,10	±0,3	±1,0	±1	±2	±5
0...100	±0, 04	±0,08	±0,10	±0,2	±1,0	±1	±2	±5

Продовження таблиці 3.2

Діапазон вимірюємих температур, °С	Ціна поділки шкали, °С							
	0,01	0,02	0,05	0,1 та 0,2	0,5	1	2	5 та 10
200...300	–	–	±0,40	±1,0	±2,0	±3	±4	±5
300...400	–	–	–	±1,0	±3,0	±4	±4	±10
400...500	–	–	–	–	±3,0	±5	±5	±10
500...600	–	–	–	–	–	±6	±6	±10
600...700	–	–	–	–	–	±6	±6	±15

Для ртутних РСТ у першому наближенні висота підйому вершини стовпчику у капілярі визначається рівнянням $H = 18 \cdot 10^{-5} V_0 S^{-1} \Delta t$, де V_0 — об'єм резервуару, S — площа перерізу каналу у капілярі, Δt — зміна температури. Так, при $V_0 = 1 \text{ см}^3$ та діаметрі капіляру близько 0,1 мм $H \Delta t = 20 \text{ мм} \cdot \text{К}^{-1}$. При кроці поділки в 1 мм ціна поділки дорівнює 0,05 К/поділку. Збільшення резервуару та зменшення перерізу капіляру приводить до підвищення чутливості термометричної системи. Практично ж ємність резервуару вибирають не більше 1 см^3 , а діаметр каналу в капілярі не менше ніж трохи сота частка міліметра. Такі розміри характерні для стандартних термометрів з ціною поділки 0,01К, що випускаються промисловістю (ТР-1). Подальше зменшення діаметра каналу в капілярі призводить до різних небажаних наслідків. Серед них основним є не плавність переміщення вершини стовпчика, обумовлена, вочевидь, варіацією меніскового тиску внаслідок шорсткості внутрішньої поверхні капіляра. Зовні здається, що діє явище гістерезису: на показання термометра починає впливати не тільки температура, але і напрямок її зміни — однаковій температурі відповідають різні показання. Один із прийомів часткового усунення гістерезису складається у нанесенні легких ударів по головці термометра. При точних визначеннях повинні бути регламентовані не тільки обмірювані фіксовані значення, але і підхід до них. Наприклад, при прив'язці показання термометра до потрійної точки води чи в інших аналогічних випадках рекомендується термометр попередньо витримати у середовищі, що має незначно більшу температуру. При цьому підхід до фіксуємого значення нормується за знаком першої похідної. Таким чином, у рідинно-скляних конструкціях здійснення чутливості, що доходить до 10^{-4} К . Крок між оцінками суміжних поділок шкали не допускається менш 0,3 мм. Оцифрування проводиться через 5...25 поділок.

Межі допустимих похибок показань термометрів залежно від меж вимірюваних температур наведені у табл. 3.2.

3.3. Рідинні скляні термометри, які випускаються промисловістю та спеціального призначення

Види термометрів, їх типи, межі вимірювань та ціна поділки наведені у табл. 3.3[9].

Таблиця 3.3. — Основні види термометрів та їх коротка характеристика

Термометри	Тип	Межі вимірювання температур, °С		Ціна поділки шкали, °С
		Від	До	
Метеорологічні	ТМ	–70	+85	0,05; 0,01; 0,2; 0,5; 1
Лабораторні	ТЛ; ТР	–30	+350	0,05; 0,02; 0,01; 0,5; 0,2; 0,1; 1; 2
Для нафтопродуктів	ТН	–80	+360	0,5; 0,2; 1; 2
Для сільського господарства	ТС; ПС	20	+100	0,5; 0,2; 0,1; 1
Промислові	ТП	–55	+350	0,5; 1; 2; 5
Технічні	А; Б; ТТ-4; ТВВ	–35	+600	0,5; 1; 2; 5; 10
Побутові	ТБ; ПБ	–5	+45	0,5; 0,1; 1
Спеціальні	СП	–45	+290	0,01; 0,2; 0,5; 1; 2; 5
Контактні	ТК; ТПК; ТЗК	–30	+600	1; 2; 5; 10

Рідинні термометри заповнюють різними термометричними рідинами, застосовуваними для наступних інтервалів температур (у °С): ртуть (від –35 до +800), ртутно–талієва амальгама (від –59), толуол (від –80 до +100), етиловий спирт 96% (від –110 до +70), гас (від –20 до +250), петролейний ефір (від –120 до +25) і т.д. Як уже раніше зазначалось, із усіх рідин кращою є ртуть, тому що вона не змочує поверхню скла, її легко одержати хімічно чистою, лишається рідкою у великому інтервалі температур (від –38,87 до +356,58 °С). Температурний коефіцієнт розширення ртуті приблизно в 500 разів більше температурного коефіцієнта розширення скла. Порожнина трубки над термометричною рідиною заповнюється інертним газом, наприклад, азотом, під тиском до декількох атмосфер. Порожнина трубки ртутних термометрів для вимірювання температур до 600 °С наповняється газом під тиском до 20 ат., а для виміру температур до 750 °С — під тиском понад 70 ат. Нертутні рідинні термометри мають тиск повітря у капілярі до 1 ат. Порожнину трубки контактних термометрів заповнюють воднем під тиском 1 ат.

3.4. Серійні РСТ, що випускаються промисловістю

Загальні технічні характеристики РСТ, що виробляла промисловість колишнього СРСР та які використовують зараз, наведені в табл. 3.3. Залежно від форми нижньої частини ГОСТ 2823–73 передбачає такі виконання: прямі (П) і кутові (угловые – рос.) (У). У випадку, якщо кут між нижньою і верхньою частинами не дорівнює 90°, у таблицях проти букви умовної позначки показаний кут між верхньою і нижньою частинами, наприклад У135. Відсутність цифри при позначенні кутового виконання означає поворот нижньої частини на 90°. За конструктивним оформленням шкали розрізняють (ГОСТ 9177–74 і ГОСТ 215–73) такі типи РСТ[1]: А – кийові (палочний – рос.) з капілярних трубок, на зовнішній поверхні яких нанесена шкала; Б – із вкладеною шкальною пластиною, укладеною усередині скляної оболонки термометра; У – із зовнішньою шкальною пластиною, на якій закріплюється скляна конструкція РСТ. Для позначення термометричної рідини у таблицях прийняті наступні позначення: Рт – ртуть, ПЕ – петролейний ефір, Пн – пентан, То – толуол, Кр – гас, СЕ – спирт етиловий, СА – спеціальна амальгама. Третя буква позначає наявність фарбування в органічній термометричній рідині: О – пофарбовану, Н – незабарвлена. В залежності від умов експлуатації розрізняють РСТ у таких виконаннях: повного занурення і часткового занурення. У таблицях міра занурення відзначається буквами чи цифрами, що позначають глибину занурення в міліметрах. Літерні оцінки мають такі значення: п – повне занурення всього термометра, нч – занурення тільки нижньої частини, ото – занурення до відлічуваної температурної оцінки, п0о – занурення до нульової відмітки оцінки.

Лабораторні термометри – велика група РСТ загального призначення для вимірів в діапазоні температур – 200–500 °С з ціною поділки починаючи від 0.01 К. Загальний вигляд лабораторних РСТ подано на рис. 3.1[1].

Стосовно до специфічних умов лабораторного обладнання виготовляють спеціальні термометри, наприклад, для бактеріологічних термостатів (ТЛ-7 та ТЛ-7а). До цієї ж категорії можна віднести лабораторні РСТ із конусними взаємозамінними шліфами (ТЛ-50), подані на рис. 3.2, 3.3 та 3.4). Вони призначені для вимірювання температури в лабораторному вузькошийковому посуді і апаратах, обладнаних конусними шліфами, з якими взаємозамінно сполучаються конусні шліфи термометрів. Для точних вимірювань температур та їх різниць виготовляється досить широка серія

РСТ, у яких відстань між штрихами по всій шкалі є однаковою. Вони позначаються ТР (термометр рівноподілений) і призначені для використання в якості зразкового.

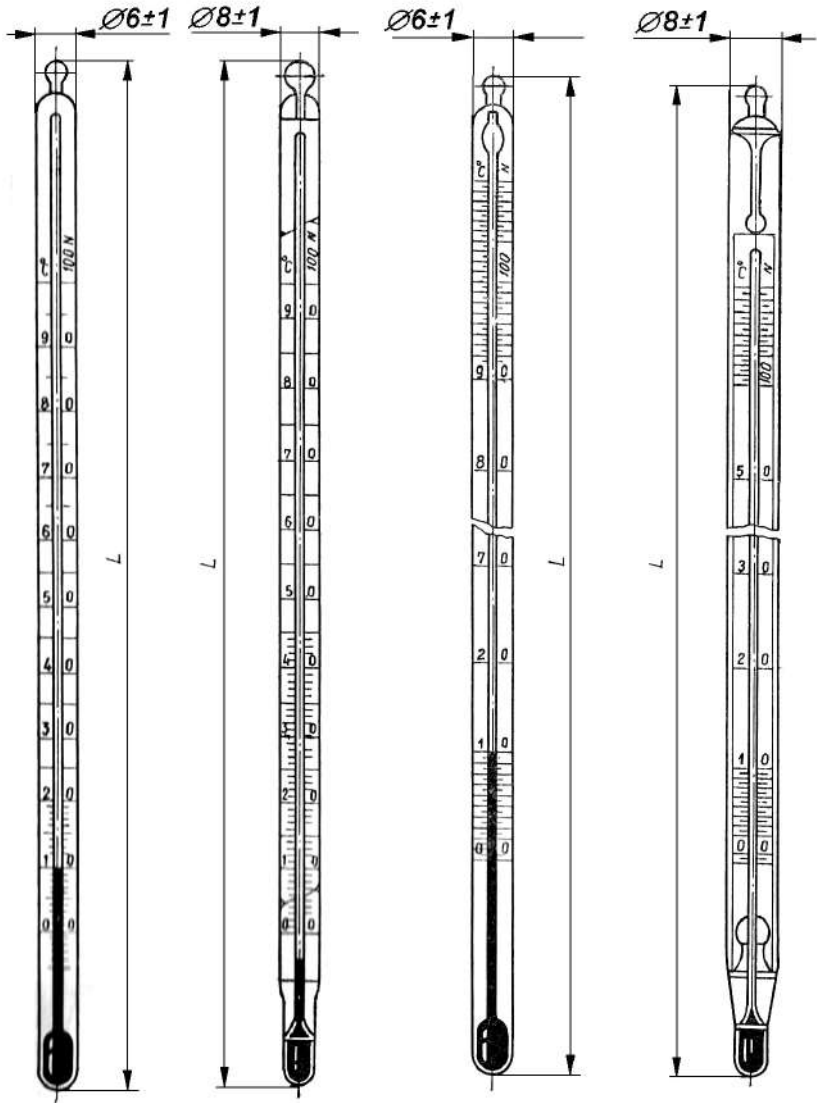


Рис. 3.1. Лабораторний термометр типу А (L — довжина термометра)

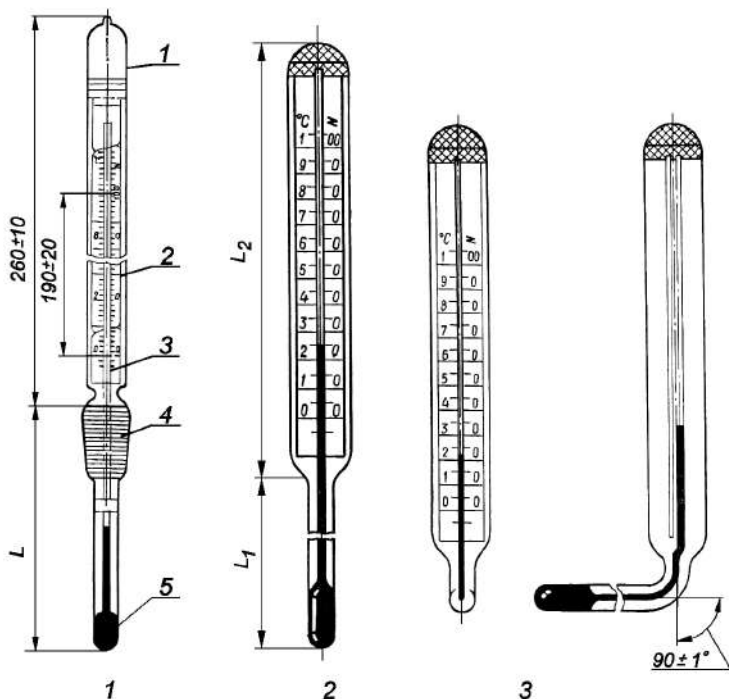


Рис. 3.2(1). РСТ із взаємозамінними шліфами: 1– оболонка; 2 — шкала; 3 — капіляр; 4 — шліфи; 5 — резервуар; L — розмір, що встановлюється[1]

Рис. 3.3(2). Технічний термометр у прямому виконанні L_1 , L_2 — довжини відповідно нижньої і верхньої частин[1]

Рис. 3.4(3). Технічний термометр у кутовому виконанні[1]

При зразкових вимірюваннях перехід від поділок рівноподіленої шкали до температури проводять за таблицями, що складаються індивідуально для кожного термометра в процесі його атестації.

Промислові термометри (рис. 3.3 та 3.4.) відрізняються від лабораторних більшою пристосованістю до умов промислових установок і апаратури, для вимірювання температури в яких вони призначені (вулканізаторний, акумуляторний, авіаційний і т.п.), більшою простотою виконання, невибагливістю і дешевістю. Вібростійкі варіанти випускаються в металевій оправі на спеціальних прокладках і повинні витримувати вібрацію з прискоренням до 1,5g з частотою 10...60 Гц. Більшість технічних РСТ у прямому виконанні мають кутові аналоги.

Спеціальні термометри (табл. 3.3) характеризуються ще більш вузькою, ніж лабораторні і промислові, пристосованістю до специфічних умов установок і апаратури порівняно виняткового застосування, а отже, меншою універсальністю. Деякі з них призначені для вимірювань у спеціальних установках, де спостереження за показанням проводяться через дзеркало. Для зручності відліку оцифрування і видимі написи на шкалі виконані у дзеркальному відображенні.

Побутові, сільськогосподарські і метеорологічні РСТ мають єдину об'єднуючу ознаку — нечисленність типів виробів кожного напрямку і незручність поліграфічного оформлення маломірних індивідуальних таблиць.

Термоконтактори[1] являють собою РСТ з упаяними у капіляр електричними контактами, замикання ланцюга в який відбувається в залежності від положення меніска металевої термометричної рідини. Завдяки такій особливості термоконтактори дозволяють одержувати пряму дискретну інформацію про температурний стан резервуара РСТ у вигляді системи електричних сигналів. Оскільки в термоконтакторах необхідно вставляти контактний провід у капіляр чи впаювати в нього контакти, діаметр капіляра, а отже, і розмір резервуара потрібно вибирати помітно більшими, ніж у звичайних вимірювальних РСТ.

Термоконтактори використовують у системах сигналізації, контролю й автоматизації за температурним параметром. Так само, як і звичайні РСТ, термоконтактори випускають у прямому і кутовому виконанні. За конструкцією їх розділяють на пристрої з рухливим контактом (ТРК, рис. 3.5(1)) і заданими постійними контактами (ТЗК, рис. 3.6(2)) і ТК 1. У всіх конструкціях загальний сполучний контакт виконують із платинового дроту діаметром 0,1 мм і упаяють у нижню частину капіляра. У ТРК виконавчий контакт виконують з вольфрамового дроту діаметром не більше 0,1 мм, закріпленого зверху на переміщуваний мікрометричним гвинтом гайки. Нижній кінець вольфрамового дроту вставлений у капіляр і повинен переміщатися в ньому вільно у всьому діапазоні регулювання температури. Обертанням мікрометричного гвинта можна варіювати положення місця зіткнення контакту з меніском термометричної рідини — ртуті. Обертання гвинта проводиться за допомогою герметичної магнітної муфти. Простір над меніском ртуті для збільшення терміну служби заповнено сухим воднем під тиском не менш 65 кПа для термоконтакторів з рухливим контактом і під тиском не менш 80 кПа — для приладів із заданими точками контактування.

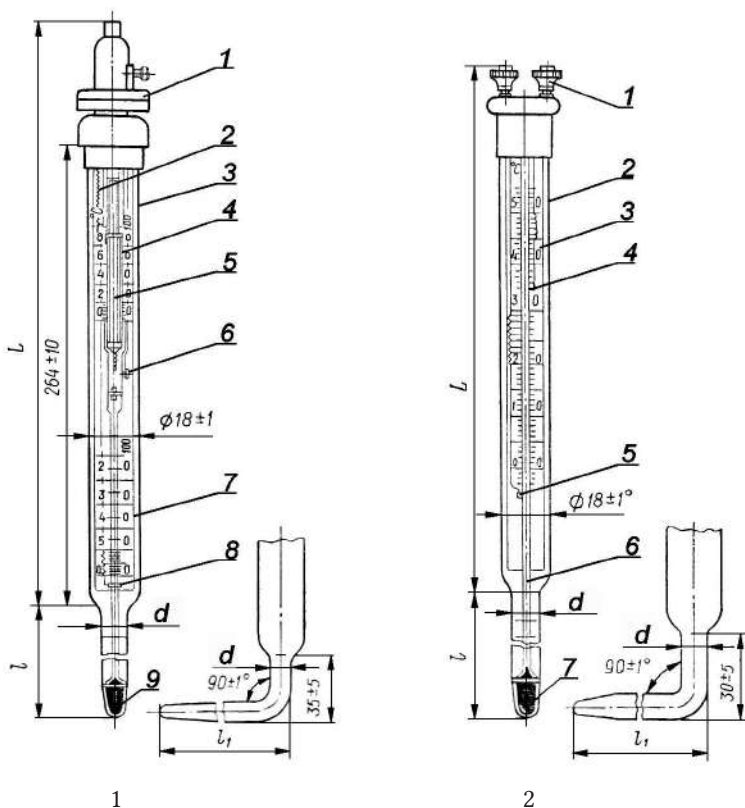


Рис. 3.5.(1). Термоконтактатор з рухливим контактом: 1 — постійний магніт; 2 — мідний дріт; 3 — оболонка; 4 — верхня шкала; 5 — мікровинт; 6 — рухливий контакт; 7 — нижня шкала; 8 — непорушний контакт; 9 — резервуар; l — довжина нижньої частини; L — довжина верхньої частини; l_1 — довжина вигнутої частини; d — діаметр нижньої частини.

Рис. 3.6.(2). Термоконтактатор з заданим контактом: 1 — затиск; 2 — оболонка; 3 — шкала; 4, 5 — контакти; 6 — капіляр; 7 — резервуар; l — довжина нижньої частини; L — довжина верхньої частини; l_1 — довжина вигнутої частини; d — діаметр нижньої частини.

На шкальній пластині ТРК наносять дві шкали. Оцифрування і розподіл нижньої шкали відповідають положенню ртутного меніска при температурі резервуара. Верхня шкала має адекватну нижній оцифрування і розподіли її призначені для установки показчика на гайці повзуна в положення, що відповідає температурі контактування.

Допустима похибка термометрів типу ТРК і похибка установки точки контактування не перевищують ціни поділки настановної шкали.

У термометрах із заданою температурою контактування в місцях капіляра, що відповідають положенню меніска при заданій температурі, впаюються платинові контакти, аналогічні нижньому сполучному. На сполучний і задані платинові контакти для зручності звертання і виключення втрат напаюється скляний гудзичок, після якого встановлено контактний нероз'ємний паяний перехід на провід з міді діаметром менш 0,3 мм.

Значення заданих температур контактування позначені спеціальними відмітками на шкалі. Кількість заданих точок контактування у виробів, що випускаються серійно, може доходити до трьох. При необхідності великої кількості точок контактування простіше обійтися збільшенням кількості використовуваних термоконтакторів. Інтервал між сусідніми точками контактування — не менш 10% діапазону, охоплюваного шкалою.

Термоконтактори можуть працювати в мережах постійного і змінного струму промислової частоти. Для роботи в мережах ланцюгах постійного струму контакти мають маркування полярності (+ чи -). Сполучний нижній контакт повинний бути підключений до «мінуса». Вимоги до електричного ланцюга, у якому працює термоконтактор, обумовлені головним чином виключенням можливостей утворення в контактах іскор і дуги. Для цього потужність комутації термоконтакторів не повинна перевищувати 1 Вт при силі струму не більш 40 мА і максимальній номінальній напрузі не більш 220 В. При дотриманні таких умов усі виготовляемі промисловістю термоконтактори забезпечують не менш 10^5 замикань і розмикань з імовірністю не менш 88%. При зниженні робочого струму до 0,5 мА число циклів перевищує 10^6 . Для термоконтакторів кийового типу серії ТК за тих самих умов експлуатації і гарантії число замикань і розмикань складає половину зазначених.

Підвищення точності контактування, як, наприклад, у ТК-53, досягається за рахунок помітного збільшення обсягу резервуара: у малій моделі (ММ) довжина резервуара 60 мм при діаметрі 6 мм; у великій моделі (БМ) довжина резервуару 100 мм при діаметрі 9 мм. Якість виконання визначається сортом. При виготовленні в першому сорті ТК-55БМ має чутливість, рівну 0,01 К.

Коректність регулювання температури залежить не тільки від точності чуттєвого елемента — термоконтактора, але і від правильності рішень комплексних тепло- і електротехнічних задач.

Контрольні запитання.

1. У чому полягає принцип дії рідинного скляного термометра?
2. Назвіть класи, на які поділяють термометричне скло.
3. Які ви знаєте основні види термометрів? Наведіть їх класифікацію.
4. Які ви знаєте види термометричних рідин?
5. Що таке термоконтактатор? Поясніть принцип його дії та для чого його застосовують?

Лекція 4.

Контроль температури виробничих процесів за допомогою пірометрів та тепловізорів

ПЛАН

- 4.1. *Теоретичні основи вимірювання температури пірометрами.*
- 4.2. *Пірометрія та пірометри. Їх переваги та недоліки.*
- 4.3. *Сучасні пірометри.*
- 4.4. *Тепловізори.*

4.1. Теоретичні основи вимірювання температури пірометрами.

Термометричні засоби, основані на тепловому випромінненні тіл, називають пірометрами випроміннення, або просто пірометрами[1]. При температурі, відмінній від абсолютного нуля, кожна поверхня випромінює електромагнітні хвилі. Теплове випроміннення — це електромагнітне випроміннення з довжиною хвилі у діапазоні 0,1...1000 мкм. Всередині цього діапазону знаходиться область видимого випроміннення (0,4...0,8 мкм).

Теорія теплового випроміннення базується на електромагнітній теорії Максвелла. Детальний опис законів випроміннення наведено у ряді фундаментальних монографій [10, 11] та ін.

Закон Кірхгофа. При однакових довжинах хвиль та однакових температурах у всіх тіл коефіцієнт випроміннення дорівнює коефіцієнту поглинання:

$$\epsilon_{\lambda} T = \alpha_{\lambda} T. \quad (4.1)$$

Коефіцієнт повного теплового випроміннення ϵ_r дорівнює відношенню випромінювальної здатності цього випромінювача до випромінювальної здатності абсолютно чорного тіла при тій самій температурі. Аналогічні відношення такі ж й для монохроматичного випроміннення ϵ_{λ} .

Коефіцієнт випромінювальної здатності, визначений інтегруванням в області від λ_1 до λ_2 , називається коефіцієнтом часткової випромінювальної здатності [1]

$$\varepsilon = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda T} d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda T}^0 d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_{\lambda} M_{\lambda T}^0 d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M_{\lambda T}^0 d\lambda} \quad (4.2)$$

де $M_{\varepsilon, \lambda}^0$ — спектральна густина енергетичної світимості чорного тіла;
 λ — довжина хвилі; T — коефіцієнт пропускання.

Закон Планка формулюють у наступному вигляді:

$$M_{\lambda T}^0 = C_1 \lambda^{-5} (e^{c_2 / \lambda T} - 1)^{-1}, \quad (4.3)$$

де C_1 — перша постійна випромінювання, дорівнює $3,741832 \cdot 10^{-16} \text{ Вт} \cdot \text{м}^2$;

C_2 — друга постійна випромінювання, дорівнює $1, 438786 \cdot 10^{-2} \text{ м} \cdot \text{К}$.

Інтегрування рівняння (4.3) по всьому спектру при фіксованому значенні температури приводить до закону Стефана–Больцмана.

$$M_T^0 = \sigma T^4, \quad (4.4)$$

де σ — постійна Стефана–Больцмана, дорівнює $5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} / (\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$

Для нечорного тіла з коефіцієнтом випромінювальної здатності при тій же температурі повна енергія випромінювання визначається формулою:

$$M_T = \varepsilon_T \sigma T^4. \quad (4.5)$$

4.2. Пірометрія та пірометри. Їх переваги та недоліки

Існують такі види пірометрів: радіаційна, яскравісна (яркостная — рос.), кольорова (цвітова).

Радіаційної пірометрія. Закон Стефана–Больцмана для інтегрального потоку енергії є теоретичною основою радіаційної пірометрії. Прилади, призначені для вимірювання температури тіла за тепловою дією його повного випромінювання, називають пірометрами повного випромінювання. Їх градуують за чорним випромінювачем, тому при вимірюванні температури чорного тіла їх показання дають дійсне значення вимірюваної температури. При вимірюванні температур реальних фізичних тіл внаслідок їх меншої випромінювальної здатності пірометри

дають занижені показання, що відповідають деякій умовній температурі — радіаційній температурі тіла, яка завжди менше дійсної температури тіла. Різниця $T - T_p$ є систематичною похибкою, зростає з підвищенням температури та для малих ϵ_T може досягати кількох сотень кельвінів (K) (табл. 4.1) [1].

Таблиця 4.1. — Інтегральна випромінювальна здатність різних матеріалів

№ з/п	Матеріал	Температура, °C	ϵ_T
1	Залізо свіжооброблене наждаком	20	0, 24
2	Залізо покрите червоною іржею	20	0,61–0,85
3	Сталь листова з блискучим шаром окислів	20	0, 82
4	Сталь вкрита червоною іржею	20	0,69
5	Сталь розплавлена	1 600–1 800	0,28
6	Чавун рідкий	1 300	0,28
3	Мідь торгова, зачищена до блиску	20	0, 07
4	Мідь окислена	50	0,6–0,7
5	Мідь розплавлена	1 100–1 300	0,13–0,15

Яскравісна (оптична) пірометрія. Основою яскравісної (оптичної) пірометрії є енергетичні характеристики монохроматичного випромінювання. При вимірюванні температури яскравісними (оптичними) пірометрами спостерігають не енергетичну, а видиму людським оком яскравість $L'_{\lambda T}$, яка є прямо пропорційною енергетичній яскравості $L^0_{\lambda T}$. Квазімонохроматичні пірометри, які вимірюють температуру за монохроматичною яскравістю, градууються по чорному випромінювачу. Тому тільки при вимірюванні температури чорного тіла їх показання будуть відповідати дійсній температурі. При вимірюванні температури реальних фізичних тіл, що характеризуються меншою випромінювальною здатністю ніж чорне тіло, визначають не дійсну, а так звану яскравісну температуру тіла (S). Вона завжди нижче дійсної. При малих $\epsilon_{\lambda T}$ та високій температурі може досягати кількох сотень кельвінів (K). У практичних вимірюваннях яскравісної температури коректність визначення залежить, головним чином, від правильності визначення монохроматичної випромінювальної здатності об'єкта. У більшості випадків ці пірометри працюють на довжині хвилі $\lambda = 0, 65$ мкм. Випромінювальні властивості речовин на цій довжині відрізняються від інтегральних (табл. 4.2) [1].

Таблиця 4.2. — Спектральна випромінювальна здатність деяких матеріалів для $\lambda = 0,65$ мкм

№ з/п	Матеріал	ϵ_λ	№ з/п	Матеріал	ϵ_λ
1	Залізо тверде	0,39	4	Чавун твердий	0,37
2	Сталь тверда вуглецева	0,44	5	Титан твердий	0,63
3	Сталь рідка	0,37	6	Мідь тверда	0,11
Метали та сплави з окисленою поверхнею					
1	Алюміній	0,22–0,40	6	Титан твердий	0,50
2	Залізо	0,70	5	Мідь	0,70
3	Сталь тверда вуглецева	0,80	7	Чавун твердий	0,70

Кольорова(цвіткова) пірометрія. Співвідношення Віна свідчить про те, що у міру підвищення температури тіла максимум інтенсивності випромінення зміщується у бік більш довгих хвиль. Тобто можна визначити температуру за характером розподілення енергії у спектрі випромінення тіла. Спочатку пропонувалось визначати температуру за кольором випромінення. Тому температура, яку було визначено таким чином, називають кольоровою, а сукупність методів — кольоровою (цвітковою) пірометрією. Далі наведені формулювання цієї температури(за Рібо).

1. Кольорова температура джерела — температура чорного тіла, яке має таке відносне спектральне розподілення, що й досліджуване джерело.
2. Кольоровою температурою джерела є температура чорного тіла, яке для довжин хвиль λ_1 та λ_2 володіє таким же відношенням монохроматичних яскравостей, що й вивчаєме джерело.
3. Кольорова температура джерела визначається порівнянням випромінення цього джерела з випроміненням чорного тіла, температура якого змінюється доти, поки його випромінення стане того ж кольору, що й джерело.

Пірометри спектрального відношення (кольорові), також як і квазімонохроматичні, повіряються по чорному випромінювачу, тому при вимірюванні температури чорного тіла показання пірометра відповідають дійсній температурі. У реального фізичного тіла коефіцієнти випромінювальної здатності $\epsilon_{\lambda 1T}$, $\epsilon_{\lambda 2T}$ для довжин хвиль λ_1 та λ_2 можуть відрізнятися, відповідно, відношення $L_{\lambda 1T} / L_{\lambda 2T}$ може відрізнятися від аналогічного відношення для чорного тіла при тій же температурі. Тому показання приладу при вимірюванні температури нечорного тіла можуть відрізнятися від реального значення температури. Ця умовна температура називається кольоровою температурою тіла.

Кольорова температура T_c реального випромінювача, який має дійсну температуру T — це така температура чорного тіла, при якій відношення спектральних яскравостей $L_{\lambda 1T}^0 / L_{\lambda 2T}^0$ чорного тіла дорівнює відношенню спектральних властивостей $L_{\lambda 1T} / L_{\lambda 2T}$ цього тіла. Залежність між кольоровою температурою нечорного тіла та його дійсною температурою має такий вигляд:

$$1/T - 1/T_c = (\ln \varepsilon_{\lambda 1T} / \varepsilon_{\lambda 2T}) / C_2 (1/\lambda_1 - 1/\lambda_2). \quad (4.6)$$

З формули 4.6 видно, якщо монохроматичні коефіцієнти випромінювальної здатності $\varepsilon_{\lambda 1T}$ та $\varepsilon_{\lambda 2T}$ є однаковими, то права частина формули перетворюється на нуль, відповідно, кольорова температура тіла дорівнює його дійсній температурі. Таке рівняння властиво так званим сірим випромінювачам, у яких для всіх довжин хвиль спектра випромінювання монохроматичний коефіцієнт має одне й те саме значення.

Кольорова температура багатьох твердих та рідких тіл значно менше відрізняється від дійсної температури у порівнянні з радіаційною та яскравісною. До того ж поправки для переходу від кольорової до дійсної температури визначаються з більшою точністю в зв'язку з тим, що фактори, які впливають на спектральні коефіцієнти випромінювальної здатності $\varepsilon_{\lambda 1T}$ та $\varepsilon_{\lambda 2T}$, значно менше впливають на зміни відношень цих коефіцієнтів. Значно менше на результати вимірів цієї температури впливає неселективне променепоглинання у проміжному середовищі.

Похибки пірометрів випромінювання

Коефіцієнти випромінювальної здатності багатьох тіл залежать від довжини хвилі, а також від конструкції прилада та властивостей поверхні тіл. Тому рекомендації про вплив коефіцієнта випромінювальної здатності на показання різних типів пірометрів носять загальний характер.

При промислових вимірах температури методична погрішність, яка допускається, складає приблизно 0,5...1,5%. Розходження значень температури, виміряної різними пірометрами, приведено у табл. 4.3 [1].

У технологічних процесах, малочутливих до коливань температури, припустима трохи більша похибка (наприклад, у доменному виробництві); в інших випадках (наприклад, при вирощуванні монокристалів) висуваються більш жорсткі вимоги до точності вимірів. Квазімонохроматичний пірометр з ефективною довжиною хвилі 0,65 мкм (див. табл. 4.3) можна застосовувати без урахування виправлень тільки при ступені чорноти об'єкта більше 0,9, що практично не завжди виконується.

Таблиця 4.3. — Розходження між температурою, виміряною пірометрами різної дії та дійсною температурою

λ, мкм	ε(ε ₁ ,ε ₂)	Розходження при Т, К			
		500	1 000	2 000	3 000
Радіаційний пірометр (повного випромінення)					
0...∞	0,3	89	195	390	585
	0,6	60	120	240	360
	0,9	13	27	55	80
Яскравісний (квазімонохроматичний) пірометр					
0,65	0,3	(15)	60	230	500
	0,6	(6)	25	90	190
	0,9	(1)	5	20	40
2,5	0,3	55	200	600	1250
	0,6	22	80	300	630
	0,9	5	20	70	160
Кольоровий пірометр (спектрального відношення)					
0,48 та 0,65	0,7	(11)	46	200	480
	0,9	(3)	13	60	130
	0,97	(1)	4	15	35
0,8 та 1,2	0,7	15	65	280	650
0,8 та 1,2	0,9	2	18	75	180
	0,97	1,2	5	20	45

Примітка. У дужках указані значення, при яких застосування пірометрів допустимо, але не рекомендовано.

Для справедливості зазначеної умови необхідне створення чи наявність у об'єкта порожнин, що наближають величину його випромінювання до випромінення чорного тіла. У квазімонохроматичному пірометрі, створеному на основі інфрачервоного випромінювання ($\lambda = 2,5$ мкм), а також у пірометрі повного випромінювання необхідно, щоб $\varepsilon_\lambda > 0,9$. Без урахування виправлення ці пірометри придатні тільки для порівняно грубих вимірів. Коефіцієнт випромінювальної здатності матеріалів в інфрачервоній області зменшується зі збільшенням довжини хвилі, за винятком багатьох оксидів, у яких він зростає. Виправлення для пірометрів повного випромінювання, обумовлені експериментально, часто трохи менше виправлень, розрахованих теоретично, тому що в пірометрах повного випромінювання ніколи не використовується весь спектр (від нуля до нескінченності). При цьому в інфрачервоній ділянці

спектра відтинається більше енергії, ніж в ультрафіолетовому. У результаті використовується пірометром енергія зростає зі збільшенням температури швидше, ніж зростає повна інтегральна енергія, що викликає значне зниження похибок. Це належить, у першу чергу, до пірометрів повного випромінювання, призначених для вимірів високих температур. У них використовується порівняно велика енергія короткохвильового випромінювання, тому припустимо застосування скляних об'єктивів, що поглинають значну частину інфрачервоного випромінювання. Таким чином, зазначені пірометри близькі за своїми властивостями до короткохвильових квазімонохроматичних пірометрів. У пірометрах повного випромінювання з більш широкою спектральною характеристикою, облаштованих, наприклад, кварцовим чи флюоритовим об'єктивом, останній діє майже так само, як скляний об'єктив у пірометрах, призначених для виміру високих температур. Таким чином, зазначені пірометри також близькі до короткохвильових монохроматичних пірометрів. Якщо квазімонохроматичний пірометр працює у більш короткохвильовій ділянці спектра, то методичні похибки знижуються. У зв'язку з тим, що коефіцієнт випромінювальної здатності більшості матеріалів збільшується з зменшенням довжини хвилі, методична похибка зменшується в два-пять разів у порівнянні з червоною областю при використанні синьої або ближньої ультрафіолетової частини спектра. У цьому випадку використання квазімонохроматичного пірометра реально тільки для вимірів досить високих температур (1 200 °C). Пірометри спектрального відношення, які використовують видиму або ближню інфрачервону частину ділянки спектра, відповідають середнім вимогам за точністю при $\epsilon_{\lambda} \geq 0,97$. Методичні похибки пірометрів знижуються при вимірюванні більш низьких температур. При цьому зазвичай підвищуються вимоги до точності вимірів та, крім цього, виникають труднощі через малою енергію, що випромінює тіло. Тому пірометри, дія яких обмежена видимою частиною спектра, не можна застосовувати для вимірювання температур нижче 1 000 К. Пірометри, дія яких обмежена діапазоном інфрачервоного випромінювання, мають певні перспективи для вимірювання низьких температур та малопрідатні для вимірювання високих.

Похибки, обумовлені поглинанням середовища

У промислових умовах через запиленість та задимленість приміщення, в якому знаходиться розжарене тіло, а також внаслідок наявності водяної пари коефіцієнт поглинання може значно перевищувати 20% та, відповідно, можуть збільшуватись похибки вимірювань. У таких умовах поглинання, як правило, безперервно змінюється, бо концентрація пилу, диму та парів

води не залишається постійною, тому введення поправок зазвичай не досягає мети. Іноді вдається звести нанівець вплив забрудненого середовища на точність вимірів температури, застосовуючи обдування стисненим повітрям. У деяких конструкціях пірометрів, що працюють в інфрачервоній частині спектру, для зменшення впливу проміжного середовища на показання пірометру застосовують світлопроводи із скла, кварцу або сапфіру. Приймаючий торець світлопроводу розміщують у безпосередній близькості об'єкта.

При вимірюванні температури деталей у герметичних печах доводиться проводити вимірювання крізь оглядове скло. Послаблююча дія цього скла — пірометричне послаблення $A = 1/T_0 - 1/T$. Поправка A практично не залежить від вимірюваної температури, бо ефективна довжина хвилі квазімонохроматичного пірометра незначно змінюється із зміною вимірюємої температури, тому нею можна знехтувати.

Поправка A зберігається, доки оглядове скло залишається чистим (це необхідно періодично перевіряти). При зміні забруднення скла облік впливу поглинання в ньому ускладнюється. Для зменшення швидкості забруднення корисно оглядове скло обладнати заслінкою, яку відкривати тільки на час вимірювань. Вплив оглядового скла на показання пірометрів часткового чи повного випромінювання ускладнюється через варіації ефективної хвилі випромінювача та селективності скла на широкий спектральний дільниці, використаної пірометрами. Тому визначення поправки A слід проводити при декількох значеннях температури у робочому діапазоні з метою забезпечення можливості отримуваних таким чином поправок: вони неминуче залежать від матеріалу та товщини оглядового скла. При вимірюваннях також слід брати до уваги похибки, які обумовлені неоднорідностями температури об'єкта, температуру якого вимірюють; стороннім випроміненням (при вимірюванні температури об'єкта, близької до оточуючого середовища).

Оптичні пірометри з зникаючою ниткою

Квазімонохроматичні візуальні пірометри широко застосовуються для вимірювання яскравісних температур вище 800 °С у виробничих та лабораторних умовах. При використанні їх для реєстрації або автоматичного регулювання температури з'являються певні практичні труднощі.

Принцип дії оптичних пірометрів заснований на залежності квазімонохроматичної яскравості чорного тіла від температури, що виражена законом Вина. При вимірюванні температури пірометром яскравість випромінювача порівнюється із яскравістю каліброваного джерела випромінювання, вбудованого у пірометр. Зображення випромінювача за допомогою лінзи об'єктива

пірометра фокусується у площині нитки пірометричної лампи. Спостерігач через окуляр та червоний світлофільтр бачить нитку лампи на фоні зображення випромінювача. Регулюючи реостатом силу струму, який проходить через лампу від джерела струму, спостерігач плавно змінює яскравість нитки до зрівнювання з видимою яскравістю випромінювача. При рівності яскравостей випромінювача та нитки остання «зникає» на фоні зображення випромінювача. Виходячи з рівності величин яскравостей, можна зробити висновок про рівність яскравісних температур випромінювача та нитки лампи. Виконане раніше калібрування, при якому визначали залежність між силою струму, що проходить крізь лампу та її яскравістю температурою дозволяє відраховувати вимірювану температуру за показаннями приладу.

4.3. Сучасні пірометри

Деякі типи сучасних пірометрів іноземного виробництва наведені в табл.4.4[12–17].

Таблиця 4.4. — Типи та технічні характеристики пірометрів іноземного виробництва

Тип, марка	Діапазон вимірюємих температур, °C	Оптичне розрізнення, (D:S)	Країна, виробник	Примітка
CEM DT-8806H [12]	Тіла: від 30 до 42,5 °C Поверхні: від 0 до 60 °C	–	Китай, CEM	Автоматичний вибір діапазону та розрізнення 0,1 °C
CEM DT-812 [12,13]	Від –50 до 500 °C	8 : 1	Китай, CEM	Похибка: $\pm 2\%$ (або 2 °C) Розрізнення за температурою: 0,1 °C
CEM DT-8869H [14]	від –50 до 1600 °C	1 : 50	Китай, CEM	Похибка: від ± 3 °C до $\pm 1,5\% + 2$ °C (у різних діапазонах)
CEM DT-9862S [12]	від –50 до 2200 °C	50 : 1	Китай, CEM	Похибка: $\pm 3,5$ °C до $\pm 2\%$ (у різних діапазонах)
Пірометр ADA TemPro 2200[15]	від –50 до 2200 °C	50 : 1	ADA Instruments (Китай)	Похибка: ± 1 °C

Продовження таблиці 4.4.

Тип, марка	Діапазон вимірюємих температур, °C	Оптичне розрізнення, (D:S)	Країна, виробник	Примітка
CEM IR-98 Пірометр з контактним вимірювачем температури [16]	від -35 °C до 260 °C	1 : 1	Китай, CEM	Похибка: $\pm 2\%$ Розрізнення за температурою: 0,1 °C, додатково має контактний датчик для вимірювання температури на глибині до 10 см
Пірометр Raynger MT6[17]	-30 до 500°C	10 : 1	Raytek, США	Точність в діапазоні від 10 °C до 30 °C: ± 1 °C, більше 30 °C $\pm 1,5$ °C або 1,5%

Зовнішній вигляд пірометрів наведено на рис. 4.1–4.7.



Рис. 4.1. CEM DT-8806H.
Інфрачервоний медичний термометр[12]



Рис. 4.2. CEM DT-812.
Пірометр до 500 °C[12,13]



Рис. 4.3. CEM DT-8869H
Пірометр (інфрачервоний термометр) [14]



Рис. 4.4. CEM DT-9862S
Професійний пірометр з вбудованою камерою[12]



Рис. 4.5. CEM IR-98.

Пірометр з контактним вимірювачем температури[16]



Рис. 4.6. Пірометр ADA TemPro

2200[15]



Рис. 4.7. Пірометр Raynger MT6[17]

4.4. Тепловізори

Тепловізори перетворюють інфрачервоне випромінювання у видиме в реальному масштабі часу при швидкості зміни інформації, порівнянної з застосовуваною в телебаченні, вони призначені для спостереження нагрітих об'єктів за їх власним тепловим випроміненням.

Теплове зображення формується таким чином. Оптична система збирає інфрачервоне випромінювання об'єкта, здійснює спектральну фільтрацію і фокусує його на багатоелементну мозаїку чутливих площадок приймача випромінювання, що сканує простір. Чуттєві елементи приймача випромінювання перетворюють оптичні сигнали в електричні, котрі підсилюються і відтворюються на відеоконтрольному пристрої. Тепловізори знаходять застосування в медицині, пожежній справі, криміналістиці, військовій справі, авіації і т.п. Позитивними якостями тепловізорів є їхня здатність функціонувати у будь-який час доби при несприятливих умовах і давати наочне уявлення про розподіл температури на досліджуваному об'єкті.

Сучасний тепловізор — це досить складний прилад (рис. 4.8), що базується на скануючому пристрої і дисплеї, що можуть доповнюватися перетворювачем чорно-білого зображення в кольорове цифрової обробки, кольоровим графічним друкованим пристроєм, термічним комп'ютером з комплектом програм, набором змінних фільтрів[1].

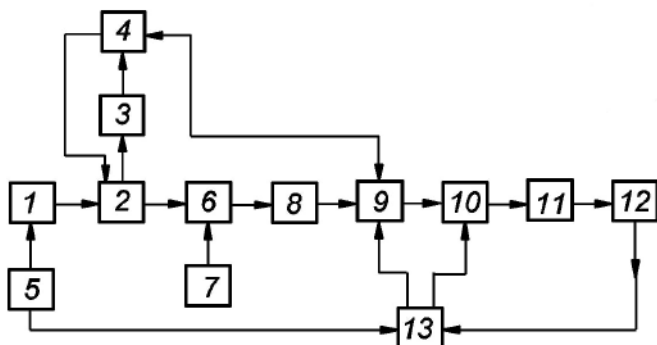


Рис. 4.8. Блок-схема скануючої системи теплобачення: 1– збираюча оптика і фільтри; 2 – пристрій сканування; 3 – датчик кодових імпульсів сканування; 4 – синхронізатор; 5 – система стабілізації і поворотний пристрій; 6 – приймач; 7 – система охолодження; 8 – предпідсилювач; 9 – пристрій обробки і посилення сигналів; 10 – відеоконтрольний пристрій; 11 – окулярна оптика; 12 – спостерігач; 13 – система регулювання

Технічні характеристики типових сучасних тепловізорів наведені у додатку 3[18–24].

Контрольні запитання

1. Які термометричні засоби називають пірометрами випромінення?
2. На якій теорії базується теорія теплового випромінення?
3. Поясніть сутність закону Кірхгофа.
4. Які види пірометрів ви знаєте?
5. Який закон є теоретичною основою радіаційної пірометрії?
6. Що є теоретичною основою яскравісної та кольорової пірометрії?
7. Поясніть похибки при вимірюванні температури, обумовлені поглинанням середовища.
8. У чому принцип дії та температурний інтервал використання оптичних пірометрів зі зникаючою ниткою?
9. Поясніть принцип дії тепловізорів та наведіть галузі їх застосування?

Лекція 5.

Контроль температури виробничих процесів за допомогою температурних індикаторів, манометричних термометрів та термоперетворювачів опору

ПЛАН

- 5.1. *Плавкі металеві вставки.*
- 5.2. *Термочутливі фарби.*
- 5.3. *Визначення температури за кольорами збіжності.*
- 5.4. *Манометричні термометри.*
- 5.5. *Термоперетворювачі опору.*

5.1. Вступ. Плавкі металеві вставки

Взагалі всі термометричні речовини є температурними індикаторами. Розглянемо температурні індикатори, для яких характерні зовнішні температурні прояви: зміна кольору, форми, структури і т.п. Метали та їхні сплави мають досить надійну сталість температур плавлення. На цьому засноване застосування термочутливих вставок, конструкція яких вибирається так, щоб плавлення приводило до необоротних і легко помітних змін, наприклад у вигляді трубки чи кільця, які зачеканюють у лунку. Вони використовуються у важкодоступних і контрольованих місцях як докази досягнення деталлю визначеної для цієї вставки температури. При низьких температурах з аналогічною метою застосовують сплави кристалічних вуглеводнів між собою і з воском. Дискретність і однозначність точки плавлення сплаву є одночасно перевагою та недоліком. Для визначень температури в деякому діапазоні застосовують серію вставок з послідовним наростанням температури плавлення. Склади сплавів, що рекомендуються для вставок, і їхньої температури плавлення наведені у табл. 5.1[1].

Конуси Зегера. Конуси Зегера являють собою набір стандартних керамічних пірамідок висотою 4...5 см, що мають різні температури розм'якшення і плавлення. Вони призначені для приблизного визначення температури в робочому просторі промислових печей, а також температури вогнетривкості матеріалів. В останньому випадку з досліджуваної речовини виготовляють таку ж пірамідку і нагрівають її разом зі стандартними, порівнюючи їхнє поведіння при плавленні.

Таблиця 5.1. – Температура плавлення плавких індикаторів

Температура плавлення, °С	Склад, % (за вагою)	Температура плавлення, °С	Склад, % (за вагою)
60,5	50Bi–25Pb–12,5Sn–12,5Cd	450	Te
		468	33Mg–67Pb
		482	55 Ag–45 Sb
92	50Bi–30 Pb–20Sn	490	26,7 Cu–73,3 Mg
156	In	510	66 Mg–34 Ni
199	91Sn–9Zn	528	24 Cu–76 Sb
215	85Pb–15 Au	542	25,4 Cu–74,6 Sb
221	96,5 Sn–3,5Ag	548	33 Cu–67 Al
232	Sn	554	66 Cu–34 Mg
236	79,7Pb–17,7Cd–2,6Sb	577	11,7 Si–88,3Al
247	87Pb–13Sb	589	86,9Al–4,8Si–8,3Mg
265	82,5Cd–7,5Zn	620	18Cd–50Ag–16,5Zn–15,5Cu
271	Bi	630	Sb
290	95Pb–5Pt	649	Mg
301	97,65Pb–2,35Ag	660	Al
304	97,5Pb–2,5Ag	710	33,5Zn–33Ag–33,5Cu
321	Cd	750	33Zn–24Ag–43Cu
327	Pb	779	71Ag–29Cu
341	30Zn–70Mg	798	Ce
360	25Sb–75Au	800	80Ag–20Cu
381	95Zn–5 Al	920	La
420	Zn	937	Ge
434	95Zn–5Ag	960	Ag

Розроблена рецептура (більш ніж для 64 конусів) дозволяє з кроком, що не перевищує 50 К, охопити діапазон температур 600...2000 °С. При швидкому нагріванні конуси Зегера показують температуру приблизно на 20 К меншу, ніж при повільному — $0,005 \text{ K} \cdot \text{c}^{-1}$ ($20 \text{ K} \cdot \text{г}^{-1}$). Застосування евтектичних сумішей досить чистих неорганічних солей дозволяє одержувати конуси, покази яких не залежать від швидкості нагрівання.

5.2. Термочутливі фарби

Термофарба — суспензія термочутливих з'єднань, наповнювачів, зв'язувачів і розчинників, що після нанесення на будь-яку тверду поверхню твердіє при висиханні у вигляді тонкої плівки і здатна змінювати свій колір при температурі переходу. Вона застосовується для контролю температури поверхонь, що мають різноманітну форму і конфігурацію, практично у будь-яких промислових умовах і в дослідницькій практиці: у машинобудуванні, авіабудуванні, приладобудуванні, радіоелектроніці та ін. Термофарби використовуються для визначення температури на поверхні як дрібних деталей, так і великогабаритних конструкцій в умовах спокою і при русі з великими швидкостями.

Термолак — колоїдний розчин термочутливих сполучень із плівкоутворювальними речовинами в летучих розчинниках, що володіє здатністю при нанесенні на поверхню твердіти при висиханні і змінювати свій колір при температурі переходу. Він має те ж застосування, що і термофарби.

Термопаста — пластично-в'язка суміш речовин, що змінюють свій колір при температурі переходу. Термопасту можна розбавити відповідними розчинниками, у результаті чого виходить або термофарба, або термолак. Вона використовується там же, де і термофарба, причому в польових умовах набагато простіша у застосуванні, особливо при упакуванні в тубах. Термопастою можна заправляти стрижні кулькових ручок.

Термоолівці — пігментовані при кімнатній температурі різними термочутливими з'єднаннями тверді стрижні, штрихи яких на поверхні твердого тіла змінюють свої кольори при температурі переходу. Іноді термоолівці ще називають *термокрейдою*. Термоолівці призначені в основному для миттєвого виміру температури вже нагрітих поверхонь, бо на відміну від термофарб деякі з них погано наносяться на холодні поверхні матеріалів, особливо на гладкополіровані. На нагрітій поверхні олівці залишають сліди незалежно від шорсткості. Їх зручно застосовувати при контролі температурних режимів термообробки, при загартуванні, зварюванні й у багатьох інших процесах. У деяких випадках вони більш зручні в застосуванні, ніж термофарби.

Термотаблетка — при кімнатній температурі тверда довільної форми і розмірів маса, пігментована термочутливими сполуками, що змінюють свій колір при температурі переходу. Як і термоолівці, термотаблетки можуть представляти всі типи термоіндикаторів. Термотаблетки застосовуються

для індикації температури всередині великих виробів чи на великих поверхнях, при контролі температури печей. Термотаблетки, що плавляться використовують при виготовленні електричних запобіжників.

У деяких випадках доцільна друкована технологія нанесення термофарби. При дрібносерійному виробництві застосовують трафаретний чи печатний друк за допомогою штампів; при великих серіях — типографічний спосіб. Друковані термофарби застосовують також для просочення стрічок друкарських машинок.

За характером перетворень згадані вище термоіндикатори поділяються на три групи: **оборотні** — індикатори, що багато разів змінюють колір залежно від температури і зберігають відповідність кольору температурі; **необоротні** — індикатори, в яких при нагріванні до температури переходу і вище відбуваються незворотні процеси, у результаті чого первісний колір після охолодження не відновлюється; **квазіоборотні** — індикатори, що, змінюючи колір при нагріванні до температури переходу чи вище її, відновлюють вихідний вигляд при зниженні температури не відразу, а поступово, під впливом вологи, що міститься у повітрі.

Термохімічні індикаторні фарби випускалися до 90-х років минулого століття Ризьким лакофарбовим заводом RILAK (Латвійська республіка). Повний набір цих термофарб дозволяв контролювати 36 значень температур у діапазоні 45...830 °C. Точність виміру температури цими індикаторами була досить високою і складала 0,5...1% для температур до 200 °C і 1% для більш високих температур. Термохімічні індикаторні олівці виробництва цього ж заводу (не зворотні) мали вигляд циліндричних стрижнів довжиною 70 мм і діаметром 8 мм, загострених з одного кінця. На даний час на сайті цього підприємства у каталозі випускаємої продукції їх немає[25]. Характеристика набору термоолівців, які випускались цим заводом у зазначений вище період часу приведена в додатку 3.

Термохімічні індикаторні порошки (оборотні), також використовують для термоконтроля, їх характеристики наведено у додатку 4.

Суміш термопорошків із кремнійорганічними безбарвними лаками у відношенні 1:1 дозволяє одержувати термолаки.

У нинішній час виробництвом термофарб займаються такі відомі фірми як «Термоколор» (ФРН), «Термопейнт» (Японія), «Color city» (Китай), «Кронос СПб» (Росія) та інші, продукція останніх двох представлена в Україні (табл. 5.2) [26–29].

Таблиця 5.2. — Марки термофарб закордонного виробництва

Країна, фірма	Торгова або фірмова марка термофарби	Діапазон вимірюваних температур або температура переходу, °C	Початковий колір	Колір після дії температури	Число колірних переходів
Китай, «Color city»[26].	TRIN 50 CBR	50	безколірний	червоний	Реверсивна
Китай, «Color city»[27].	TPIN 65 CBR	65	безколірний	червоний	1
Китай, «Color city»[28]	TEMP_REV_BLACK_70	70	чорний	білий	Реверсивна
Китай, «Color city»[29]	TPIN 120 CBR	120	безколірний	червоний	1
Росія, Кронос СПб[30]	Краска термоіндикаторна 140–160	140–160	бузковий	фіолетовий	1

5.3. Визначення температури за кольорами мінливості та розжарювання.

Визначення температури цими методами є доволі неточним і залежить значною мірою від практичного досвіду працівника, проте протягом багатьох століть це були майже єдині методи визначення температури сталевих виробів при термічній обробці, куванні та ливарних роботах. Орієнтовні значення температур, обумовлених за кольорами мінливості(побежалости — рос.) деталей з вуглецевих сталей, наведені в табл. 5.3, а залежно від кольору нагрітої сталеві деталі — у табл. 5.4.

Таблиця 5.3. — Визначення температур за кольорами мінливості[31]

Кольор мінливості	Температура,°C	Кольор мінливості	Температура,°C
Світло-жовтий	220	Фіолетовий	280
Соломенно-жовтий	240	Синій	300
Жовто-коричневий	255	Голубий	325
Червоно-коричневий	265	Сірий	330–350

Примітка. Для легованих сталей залежно від ступеня легуваності та легуючих елементів кольори мінливості з'являються при більш високих температурах.

Таблиця 5.4. — Визначення температур за кольорами нагрітих деталей[32, 33]

Колір нагрітих деталей	Температура, °C	Колір нагрітих деталей	Температура, °C
Дуже слабе світіння		Червоний	850
деталі в темноті	500	Світло-червоний	900
Темно-бурий	600	Оранжевий	950
Буро-червоний	650		
Темно-вишнево-червоний	700	Жовтий	1 000
Вишнево-червоний	750	Світло-жовтий	1 050
Світло-вишнево-червоний	800	Жовто-білий	1 100
		Білий	Від 1 200 до 1 400

5.4. Манометричні термометри

Принцип дії цих вимірників температури, що називаються манометричними термометрами, заснований на використанні однозначної залежності між температурою і тиском термометричної речовини, що знаходиться у герметично замкнутій манометричній термосистемі. Манометрична термосистема складається з термобалона, сполучної трубки (дистанційного капіляра) і пружного чуттєвого елемента, що разом утворюють герметичний об'єм, зайнятий наповнювачем — термометричною (робочою) речовиною.

У залежно від роду робочої речовини та його агрегатного (фазового) стану манометричні термометри поділяють на три класи: газові (Г), рідинні (Р(Ж — рос.)) і конденсаційні (К) чи парорідинні.

Манометричні термометри випускають у різних варіантах виконання: у вигляді показуючих, самописних приладів без чи з вбудованими пристроями сигналізації або регулювання температури. Схема конструктивного оформлення манометричного термометра приведена на рис. 5.1, а[1].

Манометрична термосистема термометра складається з термобалона, капіляра і манометричної пружини. Температура термобалона, зануреного в досліджуване середовище, функціонально перетворюється в тиск робочої речовини манометричної системи. Сполучний капіляр передає зміну тиску на манометричну пружину. Утримувач з'єднує внутрішню порожнину закріпленого кінця пружини з капіляром. Вільний герметизований кінець пружини шарнірно зв'язаний повідцем із зубцюватим сектором, що знаходиться у зацепленні з трибкою.

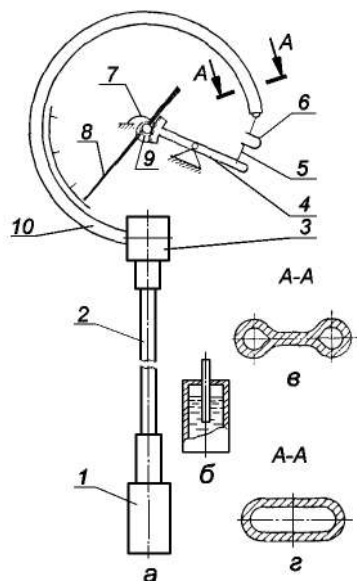


Рис. 5.1. Схема устрою по-казуючого манометричного термометра: а – термосистема; б – термобаллон; в, г – профілі перерізу пружини; 1 – термобаллон; 2 – капіляр; 3 – утримувач; 4 – сектор; 5 – поводок; 6 – компенсатор; 7 – спіральний волосок; 8 – вказівна стрілка; 9 – трибка; 10 – манометрична пружина

На осі трибки насаджений стрілка-показчик. Зазор у передавальному механізмі вибирається спіральною пружиною. Термобаллон має циліндричну форму; його діаметр і довжина залежать від роду термометричної речовини і діапазону вимірюваних температур. Термобаллон зазвичай виконують зі сталі 12Х18Н9Т. Капіляри манометричних термометрів виготовляють з латуні та сталі з зовнішнім діаметром 2,5 і внутрішнім 0,35 мм. Довжина капіляра дискретно нормована і може приймати такі значення: 0,6; 1; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10,0; 12,0; 16,0; 25,0; 40,0 і 60 м. Капіляр може бути захищений від можливих механічних ушкоджень оболонкою з оцинкованої сталевий стрічки чи поліетилену високого тиску. У термометрах тропічного виконання капіляр захищений оболонкою з нержавіючої сталевий стрічки марки Х18Н10ТМ. Манометрична пружина має перетин овальної форми (рис. 5.1, г) чи у вигляді вісімки (рис. 5.1, в). Профіль перетину пружини останнього вигляду має ряд переваг. Термометрична система заповнюється робочою речовиною під деяким тиском, різним для газових, рідинних

і конденсаційних термометрів. Термобалон конденсаційного термометра заповнений робочою рідиною на 0,7...0,75 його об'єму (див. рис. 5.1, б). Верхню частину балона заповнюють насичені пари цієї рідини. Капіляр конденсаційного термометра занурений на таку глибину, щоб його відкритий кінець завжди знаходився у конденсаті. При зміні температури термобалона змінюється тиск усередині манометричної системи, відбувається деформація (розкручування чи закручення) пружини. Вільне переміщення кінця пружини за допомогою передавального механізму (ланок 5, 6 і 7) перетворюється в обертання стрілки-показчика щодо оцінок оцифрованої у градусах шкали Цельсія. Варіація температури середовища, в якій знаходиться пружина, тобто відхилення температури пружини від її нормального значення при 20 °С, усувається за допомогою термобіметалевого компенсатора (рис. 5.1, а). У самописних манометричних термометрах тиск у термосистемі, який однозначно зв'язаний з температурою термобалона і переданий капіляром, перетворюється в деформацію спіральної пружини. Один кінець пружини закріплений в утримувачі, а вільний кінець шарнірно зв'язаний за допомогою скоби, повідця, термобіметалевого компенсатора з важелем, що жорстко з'єднаний з поворотним важелем. Перо для запису показань розташовано на кінці важеля. Запис показань виробляється на дисковій паперовій діаграмі, що приводиться в обертання (частіше зі швидкістю одного обороту за добу) за допомогою годинникового механізму чи електричного синхронного мікродвигуна. Існують модифікації манометричних термометрів, що записують показання від двох окремих термосистем. Більш докладні зведення про пристрій, роботу, монтаж і перевірку манометричних термометрів наведені у відповідних технічних інструкціях заводів-виготовлювачів.

Температурні діапазони роботи манометричних термометрів.

Манометричні термометри застосовують для виміру, запису й регулювання температури газів, парів і рідин у діапазоні — 0...1000 °С. Термометри випускаються з класами точності 1,0; 1,5; 2,5 при заповненні термосистеми газами чи рідинами і з класами точності 1,5; 2,5, 4,0 при заповненні термосистеми конденсатом. Для конденсаційних термометрів клас точності встановлюється для останніх двох третин температурної шкали.

Діапазон роботи газових манометричних термометрів — 150...600 °С. Діапазон шкал цих приладів нормований таким рядом значень: 100; 150; 200; 250; 300; 400; 600 °С. Як робочу речовину при температурах до 200 °С використовують азот, при більш високих температурах — аж до 600 °С — аргон.

Зміна тиску в термосистемі газових термометрів прямо пропорційна початковому тиску і діапазону вимірюваних температур. Через часткове перетікання газу з термобалона в капіляр і манометричну пружину лінійна характеристика порушується, однак нелінійне викривлення невелике, так що шкала газових термометрів виявляється практично лінійною. Початковий тиск у системі залежить від діапазону вимірюваних температур. Так, при $\Delta t = 0 \dots 100$ °C початковий тиск $p_n \approx 3,8$ МПа, при $\Delta t = 0 \dots 600$ °C, а $p_n \approx 1,5$ МПа.

Манометричні термометри з рідким заповнювачем розраховані на роботу в діапазоні — 150...300 °C з інтервалами вимірювання 25; 50; 100; 150; 200; 250 °C. Як робочі речовини використовують пропіловий спирт, метаксиліл, ртуть, поліметилсилоксанова рідина ПМС-5.

Об'єм термобалона істотно залежить від вибору рідини і діапазону вимірювання цього термометра. Початковий тиск у системі вибирається значним з метою зниження похибки, викликані гідростатичним тиском, що визначається різницею висот розташування термобалона і його вимірювальної системи. З урахуванням цього фактора довжина сполучного капіляра для рідинних манометричних термометрів обмежена десятьма метрами. Шкали рідинних термометрів практично лінійні.

Конденсаційні (парогазові) манометричні термометри перекривають діапазон — 50...300 °C з інтервалами вимірів для різних приладів 50; 100; 120; 150; 200 і 300 °C. Для заповнення термосистеми застосовують фреон-22 (CHF_2Cl), межі вимірів — 25...80 °C; пропилен (C_3H_6), межі вимірів — 50...60 °C, хлористий метил (CH_3Cl), межі вимірів — 0...125 °C; ацетон ($\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$), межі вимірів 100...200 °C; етилбензол (C_8H_{10}), межі вимірів — 160...300 °C.

Залежність тиску насиченої пари від температури рідини, що виражається формулою Клапейрона — Клаузиуса, є істотно нелінійною. Початковий тиск у манометричній системі конденсаційних термометрів визначається родом наповнювача і початковим значенням шкали термометра. Для цього наповнювача верхня межа шкали обмежена значенням його критичної температури. Нерівномірність шкали термометра може усуватися прийняттям додаткових конструктивних заходів — введенням обмежників деформації манометричної пружини. На відміну від газових термометрів, термобалон конденсаційних термометрів невеликий. Так, для термометра ТПП-СК діаметр і довжина термобалона складають 16 і 78 мм. У тих же умовах довжина термобалона газових термометрів варіюється від 125 до 400 мм при діаметрі 20 мм.

Похибки манометричних термометрів і способи їхнього зменшення

Методичні похибки манометричних термометрів викликаються дією ряду факторів: 1) відсутністю термодинамічної рівноваги між термобаллоном, його наповнювачем і досліджуваним середовищем; 2) відхиленням температури чи зовнішнього тиску від умов, для яких розраховувався і градуювався термометр; 3) гідростатичним тиском, що залежить від різниці рівнів розташування термобалона і ланок реєструючого приладу.

Вимірювальним перетворювачем манометричних термометрів є термобалон, а власне чуттєвим елементом — робоча речовина (наповнювач) термобалона. Задача про те, наскільки відрізняється температура наповнювача термобалона від температури досліджуваного середовища, розв'язується аналогічно роз'язку для ВПТ(вимірювальний (первинний) перетворювач температури) та інших приладів контактної дії.

У практиці вимірів термобалон термометра може встановлюватися у циліндричну захисну гільзу, а зазор між термобаллоном і гільзою заповнюється з метою поліпшення контакту рідиною чи металевими ошурками. При такому способі монтажу похибки через тепловідведення і теплову інерційність термобалона збільшуються.

Динамічна складова методичної похибки манометричних термометрів змінюється у широких межах залежно від типу термометра, розмірів термобалона, умов його теплообміну з досліджуємым середовищем. Максимальні значення показників теплової інерції манометричних термометрів усіх типів у межах: 500...800 °C — при зануренні термобалона в спокійне повітря чи інший газ; 60...120 °C — при русі газоподібного середовища зі швидкістю до 7 м/с; 15...30 °C — при зануренні в спокійну воду чи рідину з близькими до неї значеннями коефіцієнта тепловіддачі. Мінімальні значення показників теплової інерції при інтенсивному теплообміні 3...6 с. Кількість термометричної речовини у термобалоні не постійна і визначається значеннями його температури. Наповнювач (газ, рідина), що витискується з термобалона в капіляр буде набувати значення температури, які відповідають температурі навколишнього середовища (наприклад, температурі повітря приміщення, де знаходиться частина реєструючого приладу, і проходить дистанційний капіляр). Відхилення цієї температури від нормального значення призводить до виникнення додаткової погрішності. Для її зниження при проектуванні манометричних газових і рідинних термометрів установлюють визначене співвідношення

між внутрішніми об'ємами термобалона, манометричної пружини і капіляра, а також регламентують глибину занурення термобалона у досліджуване середовище залежно від довжини капіляру. Перераховані заходи дозволяють нормувати додаткову похибку манометричних термометрів, що виникає через мінливість температури навколишнього повітря. Зміна показів термометрів, викликана впливом температури навколишнього повітря при відхиленні її від 20 °С, не повинна перевищувати значень, обчислених за формулою

$$\Delta = \pm(x + R\Delta t). \quad (5.1)$$

де Δ — зміна показів приладу у відсотках від діапазону вимірів; x — значення мінливості показів, що допускається, термометрів, яке дорівнює половині абсолютного значення основної похибки, що допускається, %; R — температурний коефіцієнт, що для газових, рідинних і конденсаційних заповнювачів повинен бути відповідно не більш 0,05; 0,075 і 0,04%/K; Δt — абсолютне значення відхилення температури повітря від нормального значення, прийнятого рівним 20 °С. Вплив зміни температури повітря на механічні характеристики пружини компенсується термобіметалевим коректором (див. рис. 5.1, а). Зміна тиску навколишнього повітря призводить до появи похибки, характерної в основному для конденсаційних термометрів. Ця похибка є складовою частиною нормованої для всіх манометричних термометрів основної похибки, що допускається (див. ГОСТ 8.305–78). Додаткова гідростатична похибка, характерна для рідинних і конденсаційних манометрів, нормована обмеженнями довжини їхніх капілярів. Правила розміщення, монтажу і технічного обслуговування манометричних термометрів приводяться у технічних описах, в інструкціях з їх експлуатації.

Характеристики промислових манометричних термометрів

Характеристики промислових манометричних термометрів загально технічного призначення наведені у табл. 5.5[1].

Довжина занурення термобалона газових термометрів залежить від довжини дистанційного капіляру, а рідинних — від діапазону вимірюємих температур. Значення довжин занурення термобалонів, технічні дані сигнальних, записуючих та регулюючих пристроїв приводяться в описах та інструкціях для кожного типу манометричних термометрів.

Таблиця 5.5. — Характеристики деяких промислових манометричних термометрів[1]

№ з/п	Позначення термометра	Назва термометра	Діапазон вимірює-мих темпе-ратур, °С	Довжина дис-танційного капіляра, м	Клас точ-ності
1	ТПГ-4	Манометричний показуючий газовий	-50...+50	1,6; 2,5; 4; 6;10; 16; 25	1
2	ТПГ-4-VI	Теж, з електричним вихід-ним сигналом	Різні мо-дифікації, наприклад -50...+150	1,6; 2,5; 4; 6;10; 16; 25	1,5
3	ТПЖ-4-VI	Манометричний показуючий рідинний, з електричним вихідним сигналом	Різні мо-дифікації, наприклад -50...+150	1,6; 2,5; 4; 6;10; 16	1,5
4	ТПП-СК	Манометричний конденсаційний сигналізуючий електроконтактний	Різні мо-дифікації, наприклад -25...+35	1,6; 2,5; 4; 6;10; 16	2,5

5.5. Термоперетворювачі опору (ТО)

Дія ТО заснована на температурній залежності електричного опору. Зазначену властивість має безліч матеріалів, але лише деякі з них задовольняють вторинним експлуатаційним вимогам, зв'язаним зі стабільністю властивостей і нечутливістю до зовнішніх впливів за іншими фізичними параметрами (тиск, щільність магнітного потоку, потоку нейтронів і т.п.). Усьому комплексу метрологічних і експлуатаційних вимог задовольняє відносно вузька номенклатура матеріалів, поданих різними видами речовин, помітно здатних проводити електричний струм: металами, напівпровідниками, електролітами.

ТО володіють гарними термометричними властивостями. Типові види залежності опору від температури показані на рис. 5.2[1]. Як видно з рисунка, ТКС (температурний коефіцієнт опору) порівняно невеликий (0,3...0,6% К⁻¹) і, як правило, позитивний для металів (крива 2). Для напівпровідників α у середньому на порядок більше, ніж для металів, негативний для термісторів (крива 4) і позитивний для позисторів (крива 1). Електроліти

(крива 3) характеризуються східчастим переходом опору при температурі початку іонної провідності.

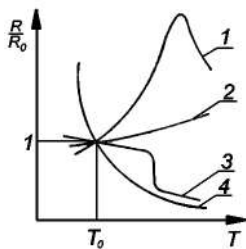


Рис. 5.2. Залежність опору різних ТО від температури: 1 — позистори; 2 — метали; 3 — електроліти; 4 — термістори(терморезистори) [1]

Прості схемні рішення дозволяють одержати широко розтягнутий малий діапазон виміру на будь-якому рівні. Завдяки високим метрологічним якостям платинові ТО використовуються для відтворення МТШ-68 у діапазоні температур 13,81...903,89 К. Напівпровідникові ТО володіють екстремальними характеристиками, що мають конструкційні варіації у широких межах. Тому вони поряд з металевими термометрами ефективно використовуються у системах вимірювань, контролю й автоматизації у промислових технологічних комплексах.

ТО складається з чутливого елемента відповідної конструкції, захисної арматури і сполучних проводів (рис. 5.3) [1]. Зміна опору чутливого елемента фіксується показуючим приладом чи регулятором. Спосіб включення ТО визначається схемою вторинного приладу і діапазоном температури, що вимірюється.

Платинові ТО

Основні вимоги, яким повинен задовольняти матеріал чутливого елемента ТО: 1) нечутливість до малих домішок, що можуть з'явитися у процесі виготовлення чи експлуатації; 2) простота технології одержання і виготовлення, у промислових умовах застосування платинових ТО, нормоване для вимірів до 1 100 °С.

Залежність відносного опору від температури для платини описується рівняннями, регламентованими МТШ-68. Для виміру низьких температур платиновими ТО із дотриманням вимог метрологічної культури доцільно користатися залежністю $T = f(W)$ у вигляді стандартної таблиці. При вимірі низьких температур опір ТО зменшується і залишковий опір складає

вже несуттєву частину всього опору ланцюга. При цьому спостерігається незначний розкид номінальних статичних характеристик ТО, обумовлений ступенем чистоти застосовуваного платиного дроту, способом його одержання, видом термічної обробки, конструкцією перетворювача. З метою забезпечення взаємозамінності ТО вони розбиваються на групи зі схожими характеристиками і комплектуються вторинними приладами, що мають відповідні статичні характеристики.

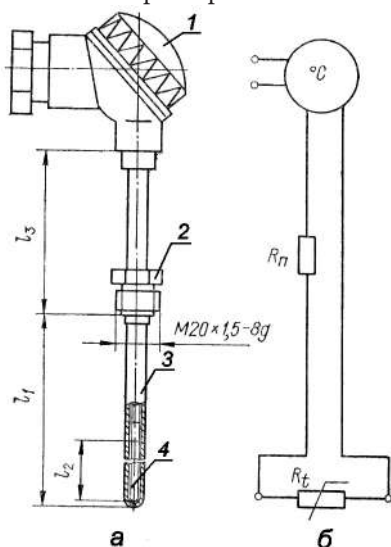


Рис. 5.3. Термоперетворювач опору: а – креслення; б – схема включення: 1 – головка; 2 – штуцерна гайка; 3 – арматура; 4 – чутливий елемент[1]

При цьому вторинні прилади можуть мати вставки для підстроювання вимірювальної схеми до фіксованих номінальних статичних характеристик. Залежно від умов застосування промисловістю випускаються платинові ТО різних конструкцій.

Вимоги до технології виготовлення ТО

Для відтворення шкали МТШ-68 при виготовленні платинових ТО чутливий елемент виконується з вільного від напруги, відпаленого, чистого платиного дроту з відношенням опорів при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ і при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ $W_{100} \geq 1,39250$. При цьому короткі ділянки чотиридротової лінії термоперетворювача, що примикають до спіралі, також виготовляються з платини. Опір ізоляції елементів конструкції повинен бути досить високим, щоб уникнути

помітного шунтування опору ТО. Складові частини ТО, що знаходяться у безпосередній близькості до чутливого елемента, виготовляються з чистих матеріалів, що не реагують із платиною при високих температурах.

Конструкції чутливих елементів

Для виміру температури до 630,74 °С застосовуються ТО, чутливі елементи яких виготовляються з платинового дроту діаметром 0,05...0,2 мм, намотаного на каркас біфілярно для усунення впливу магнітних перешкод. Як ізоляційний каркас застосовують слюдяні пластини, керамічні стрижні хрестоподібної форми перетину з кварцу чи оксиду алюмінію з канавками, у яких вільно розміщаються спіралі. Слюда в природному стані містить зв'язану воду й адсорбовані гази. У процесі вимірів гази, що виділяються, і водяні пари можуть захоплюватися дротом чутливого елемента з одночасною зміною його опору. Щоб уникнути цього, слюдяні каркаси слід перед навивкою прогріти у вакуумі. Слюда рекомендується застосовувати при температурах до 450 °С. Кварц, алунд (Al_2O_3) і порцеляна більш термостійкі і краще зберігають ізоляційні властивості. При 630 °С струм, що протікає по ізолятору каркаса, обумовлює похибку порядку 10^{-3} К.

При подальшому підвищенні температури похибка, викликана втратами ізоляційних характеристик каркаса, швидко росте і значною мірою залежить від технологій його виготовлення, потім чутливий елемент стабілізується нагріванням до 800 °С і витримкою протягом 30 хв. Тривалий час для вимірювань температури застосовувалася конструкція платинового ТО, запропонована Г.Л. Каллендаром, у якій на слюдяний хрест намотувався платиновий дріт діаметром 0,1...0,2 мм. Пізніше з'явилися ТО із керамічним каркасом. У платинових ТО для виміру з високою точністю напругу в дроті, яка виникає від деформації спіралі, зведено до мінімуму. Дріт діаметром 0,1 мм звивається у спіраль діаметром 0,45 мм, а потім біфілярно навивається на слюдяний хрестоподібний каркас, що поміщається в захисну трубку з пірекса діаметром 7...7,5 мм. Чутливий елемент з'єднаний з головкою-термоперетворювачем золотими дротами довжиною 430 мм. Як іншу типову конструкцію можна навести ТО, чутливий елемент якого виготовлений із платинового дроту діаметром 0,05 мм, опір при 0 °С близько 25 Ом. Платинову спіраль діаметром 1,5 мм поміщають в тонку U-образну пірексіву трубку з внутрішнім діаметром, що незначно перевищує зовнішній діаметр спіралі, і товщиною стінки 0,5 мм. Кінці спіралі припаяні до твердих платинових введень так, щоб спіраль була завжди вільна від напруг. Конструкція термоперетворювача являє собою

двоканальну трубку з оксиду кремнію, в канали якої поміщена спіраль чутливого елемента. У ТО Стрелкова на кварцовий гелікоїдальний каркас монтується платинова спіраль із дроту діаметром 0,07 мм. До кінців платинового дроту чутливого елемента приварені невеликі жорстко скріплені з каркасом вивідні провідники з платинового дроту. До кожного провідника приварено по два виводи зі срібного, золотого чи платинового дроту діаметром 0,2...0,5 мм. Чутливий елемент поміщається у захисну трубку з плавленого кварцу (рис. 5.4) [1].

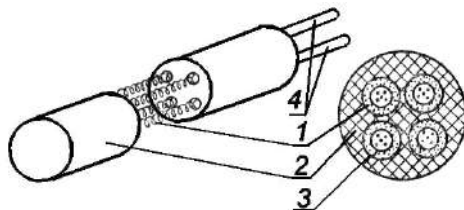


Рис. 5.4. Платиновий чутливий елемент: 1 — спіраль; 2 — каркас; 3 — порошок; 4 — виводи

Для вимірювання низьких і середніх температур каркаси чутливих елементів виготовляються зі скла з близьким до платини коефіцієнтом термічного розширення. Для виміру температур у діапазоні 630...1100 °С застосовується платиновий дріт діаметром 0,3...0,6 мм, бо дріт менших діаметрів підпадає під великий вплив сторонніх газів і парів, для каркаса при цьому застосовують синтетичний рубін (корунд). Технічні характеристики платинових чутливих елементів наведені у табл. 5.6[1].

Таблиця 5.6. — Основні технічні характеристики платинових чутливих елементів.

Позначення	Кількість чутливих елементів та НСХ перетворювання, за ГОСТом 6651–84	Клас допуску	Діапазон вимірюваних температур	Показник теплової інерції, ε_{∞} , с, не більше	Габаритні розміри, мм	
					діаметр	довжина
5Ц4.679.069	1 x 1П	В	0...+1100	3	6,5	28
5Ц4.679.069–09	1 x 100П	В	–200...+1000	2	4,8	127
5Ц4.659.069–62	1 x 50П	А	– 269...+300	1,5	4,2	38

Термоперетворювачі опору з чутливими елементами з інших матеріалів

У випадках, коли не потрібна висока точність вимірів, наприклад, для технічних цілей, чутливі елементи ТО для вимірювання низьких температур виготовляють головним чином зі сплавів та напівпровідників. Для вимірювання середніх температур застосовують мідь, нікель, вольфрам, залізо. Вимоги до конструкцій ТО з чутливими елементами з інших матеріалів аналогічні вимогам до платинових, але при цьому необхідно враховувати конкретні фізичні та хімічні властивості цих матеріалів.

Мідні ТО. Звичайна мідь, що поставляється системою торгівлі у вигляді дроту і проводів усіх необхідних розмірів, недефіцитна, дешева, чиста і гомогенна — цілком задовольняє усім вимогам, які висувають до матеріалу чутливих елементів ТО для виміру помірних температур. Істотний практичний недолік міді — при температурі вище 300 °С вона починає активно окислятися. Тому мідь застосовується в чутливих елементах ТО для виміру температур не вище 200 °С. Ізоляційні покриття мідних проводів — лак чи шовк — також не витримують впливу високих температур. До недоліків міді варто віднести і її малий питомий опір ($\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$). У діапазоні температур $-50 \dots 200 \text{ }^{\circ}\text{C}$ залежність опору міді від температури лінійна: $R_t = R_0 (1 + \alpha t)$. Тому мідні ТО застосовуються для тривалого виміру температури в діапазоні $-200 \dots +200 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Безкаркасний чутливий елемент мідних промислових ТО має безіндукційне намотування з мідного дроту, яке покрите фторопластовою плівкою. До намотування припаяні два виводи. Для стійкості елемент поміщається у тонкостінну металеву гільзу, засипається керамічним порошком і герметизується замазкою.

Залежно від діючих умов виготовляються чутливі елементи і спеціальні конструкції: від зосередженої обмотки невеликої довжини для виміру температури підшипників, до обмотки розтягнутої на кілька метрів, для виміру середньої температури нафти у резервуарі. До чутливого елемента припаюються з'єднувальні мідні проводи, що електрично ізолювані обмоткою з термостійкої нитки. Як захисну арматуру застосовують труби з різних сталей. Після виготовлення чутливі елементи стабілізуються нагріванням при температурі, що перевищує температуру верхньої межі застосування на 20 К. Похибка мідних ТО із безкаркасним чутливим елементом за рахунок зміни R_0 і W_{100} після 50 000 годин роботи при 160 °С складає 1%.

Таблиця 5.7. — Основні технічні характеристики мідних чутливих елементів

Позначення	Кількість чутливих елементів та НСХ перетворювання за ГОСТом 6651–84	Клас допуску	Діапазон вимірюємих температур	Показник теплової інерції, ε_{∞} , с, не більше	Габаритні розміри, мм	
					діаметр	довжина
5Ц4.659.070–01	1 x 10M	С	–50...+150	10	5,0	20
5Ц4.659.070–04	1 x 100M	В	–50...+150	15	5,0	80
5Ц4.659.070–14	1 x 50M	В	–50...+200	12	5,0	50
5Ц4.659.070–20	2 x 50M	В	–50...+150	16	7,0	80
5Ц4.659.070–30	1 x 50M	С	–50...+100	12	5,0	55

Якщо чутливий елемент не піддавати різким тепловим ударам або механічним деформаціям, то протягом тривалого часу можна підтримувати стабільність показань ТО з похибкою $\pm 0,01$ К.

ТО з інших чистих металів.

Крім платини та міді як матеріал для чутливого елемента ТО застосовують нікель, залізо, вольфрам, свинець, індій, олово, кадмій, ртуть, галій. Вид залежності температурного коефіцієнта опору платини, свинцю, індію наведено на рис. 5.5[1].

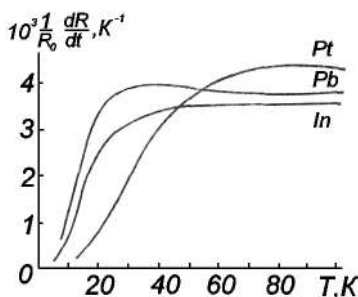


Рис. 5.5. Залежність температурного коефіцієнта опору платини, свинцю, індію[1]

Нікелеві ТО. Переваги нікелю перед міддю — високий ТКО (температурний коефіцієнт опору = $6,4 \cdot 10^{-3}$) та питомий опір ($\rho = 12,8 \cdot 10^{-8}$ Ом · м), недолік — великий вплив забруднень на ТКО. Опір нікелевих ТО, призначених для

вимірювання температур у діапазоні 200 °С, підкоряється тому ж рівнянню, що і платинові ТО ($A = 5,43 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B = 7,85 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2}$). Нелінійні складові в рівняннях опору мають різні знаки (для нікелю позитивний, платини — негативний). Це відкриває можливість створення ТО з лінійною характеристикою до 350 °С шляхом послідовного включення платинової та нікелевої обмоток з відношенням опорів, рівним 12 : 1, при 0 °С. У нагартованому нікелі відбувається структурне перетворення при 350 °С (рекристалізація).

Залізні ТО застосовуються для вимірювання температур у діапазоні 0...100 °С ($A = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$).

Вольфрамові ТО забезпечують задовільну точність при вимірюваннях температур до 1 000 °С. При вимірюваннях високих температур (більше 300 °С) чутливий елемент необхідно поміщати у герметичну арматуру.

Свинцеві та індієві ТО добре показали себе при вимірюванні низьких температур. При температурі нижче 50 К їх ТКО (рис. 5.5) помітно більше, ніж у платини та вони ефективно працюють до переходу у надпровідний стан (Pb — 7,2 К, In — 3,4 К).

Промислові ТО

Чутливі елементи зі з'єднувальними дротами називаються вимірювальними пакетами. При вимірі температури до 300 °С з метою забезпечення надійної ізоляції пакетів ТО застосовуються ізоляційні лакотканини, емалі, сплетення та ін.; при вимірі температури вище 300 °С — «наміста» з електроізоляційної кераміки.

Для усунення впливу температурної варіації опір сполучних проводів вибирають малим у порівнянні з опором чутливого елемента.

При 0 °С цей опір не повинний перевищувати 0,1% для платинових ТО і 0,2% — для мідних. З цієї ж метою ТО підключають за три- і чотири дротовою схемою (рис 5.6) [1].

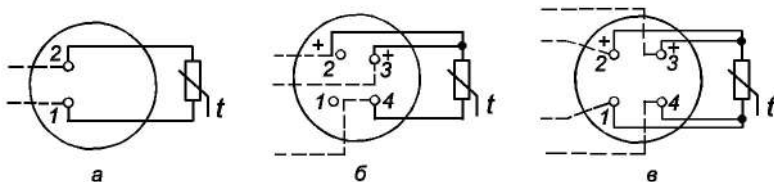


Рис. 5.6. — Схема вимірювального пакета: а — двопровідного; б — трьох провідного; в — чотирьох провідного.

Для компенсації зміни опору з'єднувальних проводів промисловістю випускаються також ТО із додатковими з'єднувальними дротами. Останні підключаються до клем контактної колодки чи контактів корпусу пластмасової головки ТО. На рис. 5.7 показані типи вимірювальних пакетів і конструкції найбільш поширених мідних і платинових ТО.

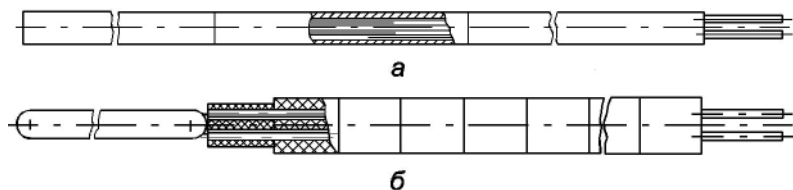


Рис. 5.7. Конструкція вимірювального пакета: а — мідного; б — платинового

Підключення з'єднувальних проводів вимірювальних пакетів до чутливого елемента здійснюється за допомогою зварювання. При вимірі температури вимірювальні пакети вставляються у захисний чохол ТО, що захищає їх від ушкоджень і забруднень. Внутрішній простір чохла засипається інгібіторним порошком.

З огляду на досвід експлуатації виготовляємих промисловістю ТО представляється можливим розділити технічні ТО на такі укрупнені групи: загальнопромислові ТО для виміру температури у різних галузях народного господарства; ТО для виміру температури в умовах з підвищеними механічними навантаженнями; ТО у вибухобезпечному виконанні для виміру температури в середовищах різних категорій вибухонебезпечності; ТО для виміру температури в атомних і енергетичних установках; ТО для виміру температури поверхонь обертових об'єктів; ТО для виміру температури поверхонь нерухомих твердих тіл, ТО для виміру температури у приміщеннях; ТО для виміру температури в криогенній техніці; ТО для виміру температури зерна; ТО з уніфікованим вихідним сигналом 0...5 мА, 4...20 мА для вимірювання температури у різних галузях промисловості.

Основні вимоги, пропоновані до технічних ТО: взаємозамінність, простота і надійність у роботі.

Залежно від умов експлуатації для виготовлення несучої і захисної арматури застосовуються скло, кварц, вогнетривкі, газоцільні, керамічні матеріали. Зовнішній кожух для зразкових ТО виконується з платини, а для технічних — з нержавіючих сталей. Майже всі зразкові ТО мають газонепроникну захисну арматуру, внутрішня порожнина якої попередньо

вакуується з нагріванням до 450 °С, потім заповнюється сухим газом та герметизується. Для заповнення арматури застосовується гелій, аргон, азот чи сухе повітря. Для захисту платини від можливого забруднення іншими металами в газове виконання ТО додається 5...10% кисню.

Внутрішній простір захисної арматури з нержавіючих сталей технічних платинових ТО заповнюється відпаленим порошком оксиду алюмінію з домішкою інгібіторів. У верхній частині внутрішній простір захисної арматури відокремлюється від навколишнього середовища пробкою з вогнетривкої маси. Матеріал захисної арматури вибирається залежно від діапазону вимірюваних температур і агресивності вимірюваного середовища об'єкта.

Напівпровідникові ТО

Терморезисторні характеристики напівпровідників значно відрізняються. Тому узагальнення їх в одному структурному підрозділі умовно. Для всіх напівпровідників характерна висока чутливість. Температурний коефіцієнт опору (ТКО) більшості терморезисторних напівпровідників на порядок, а для деяких матеріалів в екстремальних умовах — на два порядки більше відповідного середнього значення для металів.

Доцільно розділити напівпровідники, використовувані при вимірюванні низьких температур, на матеріали, що володіють **негативним ТКО**, — термістори; матеріали, що володіють **позитивним ТКО** — **позистори**. Усі напівпровідникові ТО мають порівняно невеликий термін застосування, тому вони не ввійшли в номенклатуру приладів, використовуваних у метрології.

При вимірі низьких температур поблизу 0°С найчастіше використовують германій і кремній, що мають термисторну чутливість (див. рис. 5.2, крива 2). Зі зменшенням температури росте не тільки сам опір, але і похідна — коефіцієнт опору. Опір чистих германія і кремнію збільшується настільки інтенсивно, що у потрібній точці водню (13,81 К) він є настільки великим, що матеріал практично стає ізолятором. Тому чисті матеріали можна використовувати для вимірювання температур вище 20 К.

Термісторні промислові ТО. Завдяки високій чутливості їх ефективно застосовують для виміру температур у діапазоні 170...570 °С.

Термістори виготовляються на основі оксидних матеріалів, наприклад, із твердого розчину Fe_2O_3 у матеріалах кристалічної структури типу шпінелі Zn_2TiO_4 , MgTiO_4 чи MgCrO_4 . Для ідентичності виробів з метою одержання необхідного значення опору додають стабілізуючі речовини: оксиди

нікелю, вуглецю, магнію та ін. За допомогою пластичної сполучної речовини методом пресування суміші надається необхідна форма (сферична, циліндрична, дискова). Форма виробу визначається умовами роботи, для яких він призначений. Опресована у формі заготівля разом з выводами піддається спіканню.

Для виміру температури поверхні застосовуються термістори у вигляді плоскої шайби, тонкого диска чи «намистинки» невеликого діаметра.

«Намистинковидний» терморезистор діаметром 0,5 мм, покритий глазур'ю, у спокійному повітрі має показник теплової інерції 0,3 с.

Відтворюваність ТО на базі терморезистора, зістареного протягом тривалого часу, при вимірі температури у діапазоні — 40...+ 180 °С складає $\pm 0,2$ °С. Як захисну арматуру ТО застосовують тонкостінні трубки зі скла і нержавіючої сталі, що забезпечують тепловий контакт із терморезистором.

Напівпровідникові опори КМТ, СТ1 і ПТ виготовляються на основі напівпровідникових оксидів кобальту і марганцю, ММТ і СТ2 — міді і марганцю, СТ3 і МКМТ — міді, кобальту і марганцю, СТ4 — нікелю, кобальту і марганцю; СТ5 — на основі титанату барію, легovanого 0,1% (за масою) Ge, СТ6 — на основі легovanаних твердих розчинів у системі BaTiO_3 — BaSnO_3 , СТ10 — на основі системи BaSr-TiSiO_3 , легovanної церієм.

Серійні напівпровідникові ТО не мають високої стабільності характеристик. Проте у процесі експлуатації через $(2...5) \cdot 10^3$ годин більшість їх отримує властивості, що надалі змінюються мало.

Позисторні промислові ТО.

Позистори також належать до напівпровідникових ТО, але у відмінності від термісторів мають позитивний термічний ТКО. Чутливі елементи виготовляються із сегнетоелектричних керамік на основі титанатів, цирконатів, гліцинатів і т.п свинцю, барію, миш'яку й ін. Їх ТКО 10%/К, застосовуються вони у вузькому діапазоні температур (20–100 °С) причому для кожного типу позистора діапазон виміру ще вужче і складає кілька кельвін. Позистори поки що знаходять обмежене застосування у системах автоматики і захисту, але у міру розвитку технології виробництва вони будуть застосовуватись значно ширше. Конструктивне оформлення аналогічне такому в термісторів.

Контрольні запитання.

1. Що таке термочутлива вставка? Наведіть приклади та температури їх застосування?
2. Що таке конуси Зегера? В яких технологічних процесах їх використовують?
3. У чому подібність та відмінності термофарби, термолаку термопасти та термотаблеток?
4. На які групи залежно від характеру перетворень розділяються термоіндикатори?
5. В якому інтервалі температур останню можна визначити за кольорами каління сталі?
6. В якому інтервалі температур останню можна визначити за кольорами збігливості сталі?
7. У чому полягає принцип дії манометричних термометрів?
8. Залежно від чого манометричні термометри підрозділяють на кілька класів?
9. Назвіть температурні діапазони роботи манометричних термометрів.
10. У чому полягає принцип дії термоперетворювачів опору?
11. Які ви знаєте найбільш поширені види термоперетворювачів опору?
12. В яких температурних інтервалах вимірюють температуру платинові, мідні, нікелеві, залізні, вольфрамові, свинцеві та індієві термоперетворювачі опору?
13. Які ви знаєте напівпровідникові термоперетворювачі опору? Для яких температурних інтервалів їх застосовують?
14. У чому переваги напівпровідникових термоперетворювачів опору перед традиційними металевими?

ТЕМА 2. МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШКІДЛИВИХ ГАЗІВ ТА ПАРІВ У ПОВІТРІ

Лекція 6.

Методи та прилади для визначення шкідливих газів та парів у повітрі

ПЛАН.

- 6.1. Апаратура для відбору проб повітря.
- 6.2. Основні поняття та визначення.
- 6.3. Газоаналізатори теплопровідності.
- 6.4. Магнітні газоаналізатори.
- 6.5. Електрохімічні газоаналізатори.
- 6.6. Оптичні газоаналізатори.
- 6.7. Хроматографи та мас-спектрометри.

6.1. Апаратура для відбору проб повітря

Існуючий у санітарній практиці поділ понять «атмосферне повітря» і «виробнича атмосфера» є певною мірою умовним. Забруднення приземного шару атмосфери стається завдяки промисловим викидам, вихлопним газам автотранспорту та ін. Тому методологія і техніка відбору проб як при аналізі атмосферного повітря, так і при контролі виробничої атмосфери мало відрізняються. В обох випадках відбір проби повітря є вкрай відповідальним етапом аналізу і тісно пов'язаний з наступним методом визначення пошукованої домішки. При виборі останнього варто врахувати неспівставно більше розсіювання шкідливих домішок в атмосферному повітрі у порівнянні з виробничим середовищем. Однак при розв'язанні гігієнічних задач з охорони атмосферного повітря практично обмежуються дослідженням повітря населених місць і встановленням гранично допустимих концентрацій (ГДК) атмосферних забруднень двох рівнів — максимальних разових і середньодобових.

У плані наукових досліджень з гігієни атмосферного повітря залишається актуальним вивчення і прогнозування фізико-хімічного стану систем у зв'язку зі зміною метеорологічних факторів, що має величезне профілактичне значення.

Нижче описані методи і технічні засоби відбору проб повітря[34].

Добір максимальних разових проб проводять у зонах максимального забруднення, безпосередньо у факелі, викиді чи у ряді намічених планом дослідження зонах на різних відстанях, але обов'язково з захопленням факелу. Добір проб здійснюють, як правило, протягом 20 хв. (але не більше 30 хв). У кожній точці відбирають не менше 25 проб протягом декількох днів, на рівні 1,5 м від землі (зона подиху). В окремих випадках відбирають різні проби в стаціонарних чи рухливих точках без обліку факелу, також протягом 30 хв, на рівні 1,5 м, у ранкові та у вечірні години доби, у години максимального забруднення. Відбір середньодобових проб проводять у стаціонарних і рухливих точках, у зоні подиху людини — на рівні 1,5 м від землі, на відкритих площах, у віддаленні від будівель і при відсутності видимого пилу. Проби відбирають протягом доби у період найбільшого забруднення повітря за умовами викиду забруднень в атмосферу або метеорологічними даними.

Рекомендується відбирати не менше 10–15 середньодобових проб за сезон. При цьому допускаються такі варіанти добору:

- аспірація досліджуваного повітря через поглинальну систему безупинно протягом доби;
- аспірація досліджуваного повітря через поглинальну систему з перервами у 2 чи 4 години без зміни останньої (проби відбирають 6 чи 12 разів протягом доби по 20–30 хв).

При дослідженні динаміки забруднень повітря району протягом доби проби відбирають у роздільні поглинальні системи різну кількість разів (6, 12, 24) по 20–30 хв і кожну пробу аналізують окремо.

За часів СРСР широкого застосування як повітрозабірна апаратура при аналізуванні атмосферного повітря знайшов універсальний електроаспіратор Мігунова — Кабанова (УАМК-3), а також стаціонарні електроаспіратори — різних типів (аерозольний інгалятор АІ-1та ін.) [34]. Сьогодні використовують такі типи апаратури для забору проб повітря (табл. 6.1) [35].

Залежно від агрегатного стану речовини добір проб повітря для визначення вмісту в ньому шкідливої домішки проводять протяганням визначеного об'єму досліджуваного повітря через те чи інше поглинальне середовище. Речовини у газо- і пароподібному стані уловлюють звичайно рідкими поглинальними середовищами, в яких визначаєма речовина розчиняється, чи хімічно зв'язується. При цьому повинна бути забезпечена достатня ефективність поглинання шуканої домішки. Це досягається сполученням швидкості аспірації досліджуваного повітря і конструкції застосованого поглинального приладу.

Таблиця 6.1. — Пробовідбірні пристрої

№	Назва, принцип дії, фірма-виготовлювач, країна	Тип	Визначуваний параметр	Діапазони вимірювань	Границі припустимої похибки
1	Пробовідбірні пристрої для відбору проб атмосферного повітря, повітря робочої зони та газових викидів з заданими об'ємними витратами через поглинач для подальшого аналітичного контролю. МГП «Химко», Москва, Росія	ПУ-3Э/220 В електричне, переносне, 5 каналів	Витрати газу по кожному каналу	Не більше 400 дм ³ /хв (перепад тиску не більше 4кПа)	$\gamma = \pm 5\%$
2	Пробовідбірні пристрої для відбору проб атмосферного повітря, повітря робочої зони та газових викидів з заданими об'ємними витратами через поглинач для подальшого аналітичного контролю. ЗАО «ОПТЭК», Санкт-Петербург, Росія	ОП-824ТЦ електричне, переносне, 8 каналів Витрати для 5, 6, 7, 8 каналів	Витрати для 1,2,3,4 каналів	1,0–5,0 дм ³ /хв, максимальний перепад тиску 2,5 кПа 0,2–1,0 дм ³ /хв, максимальний перепад тиску 2,5кПа	$\gamma = \pm 7\%$

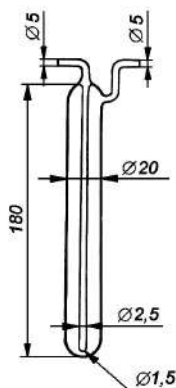


Рис. 6.1. Поглинальний прилад Петрі[34]

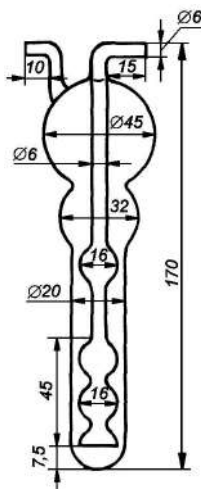


Рис. 6.2. Рідинний поглинальний прилад Зайцева[34]

Зараз найчастіше застосовуються так називані рідинні поглинальні прилади Петрі (рис. 6.1), Полежаєва, Зайцева (рис. 6.2), Ріхтера, Яворовської, Гернет та ін[34].

При необхідності добору проб повітря в умовах низьких температур ці прилади забезпечуються польовим обігрівачем, що дозволяє за допомогою нагрітої води підтримувати позитивну температуру поглинального розчину. Обігрівач (рис. 6.3) має двостінний пластмасовий корпус 1 висотою 180 мм, довжиною 105 мм і шириною 85 мм. Між зовнішньою і внутрішньою стінками корпусу запресована теплоізолююча судина 2. Корисний об'єм обігрівача складає 500 мл. На верхній грані корпусу є подвійний круглий отвір 3 діаметром 50 мм, що закривається через касетний проріз пружною мікропористою гумовою пластинкою 4 товщиною 12 мм. По довгій осі пластинки висвердлено два круглих отвори 5 діаметром 7 і 15 мм, між якими є тонкий розріз довжиною 11–12 мм. У розріз вставляють поглинач 6 так, щоб його тонка трубка йшла через менший отвір, а товста — через більший, і опускають до упору в пластинку нижньої поверхні кулі. Така конструкція кришки обігрівача забезпечує достатню термоізоляцію внутрішньої порожнини. Безпосередньо перед початком добору проби в обігрівач наливають через більший отвір у мікропористій пластинці теплу воду, потім вставляють поглинач з реагентом, після чого роблять аспірацію повітря у встановленому за методикою визначення оптимальному режимі.

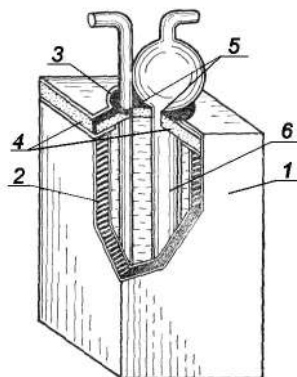


Рис. 6.3. Обігрівач із вміщеним в нього поглиначем[34]: 1 — пластмасовий корпус; 2 — теплоізолюючий посуд; 3 — подвійний круглий отвір; 4 — мікропориста гумова пластинка; 5 — два отвори у пластинці; 6 — поглинач.

Для висушування сорбентів і твердих носіїв (розміри зерен 0,2–4 мм) використовують спеціальні установки, в яких через шар зневоднюємої речовини, що розміщують у циліндричному стовпчику, зі швидкістю 1–4 л/хв, залежно від розміру часток і маси речовини, пропускають азот чи повітря. Щоб уникнути конденсації парів води нижню третину стовпчика нагрівають за допомогою трубчастої електричної печі. Температуру киплячого шару в потоці газу перевіряють за допомогою ртутного термометра, кулька якого знаходиться в шарі речовини. Пари, що видаляються, конденсуються в охолоджуваній пастці.

Останнім часом у практиці лабораторних досліджень атмосферного повітря на вміст газоподібних домішок як пробовідбірники застосовують контейнери зі скла, металу чи пластика. Принципово, щоб матеріал контейнера був інертний відносно аналізованих речовин.

У багатьох випадках, особливо при недостатній чутливості методу аналізу, рекомендується багаторазове концентрування (у 100 і більше разів) мікрокомпонентів при одночасному відділенні їх від кисню, азоту, діоксиду вуглецю і води без зміни хімічного складу проби. Це досягається методом виморожування.

Газоподібні компоненти часто можна сконцентрувати простим пропущенням повітря через криогенну пастку (рис. 6.4), температуру якої підтримують за допомогою рідкого азоту при -196°C .

При такій температурі більшість речовин знаходиться у твердому стані. Азот і кисень видаляють із проби при -196°C за допомогою вакуумного насоса чи дають википіти, підвищивши температуру на 10–20 $^{\circ}\text{C}$.

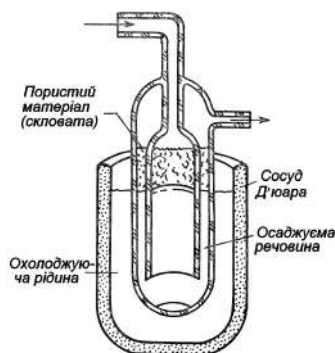


Рис. 6.4. Проточна криогенна пастка для відбору проб повітря[34]

Діоксид вуглецю відкачують, підвищивши температуру до -100°C . Для фізичного поділу речовин, які наявні у дуже малих (мікро) кількостях, використовують широкий набір охолоджуючих (криостатуючих) сумішей. Підвищення ефективності виморожувань досягають за допомогою набивання із скляних кульок, скловати й інших інертних матеріалів. Поряд з цим застосовують найбільш селективну хімічну адсорбцію з використанням твердих зернових сорбентів, а також різних рідких середовищ для розчинення і хімічного зв'язування шкідливих домішок, що містяться у повітрі.

Значним досягненням в області відбору проб повітря є поглинання малих концентрацій токсичних домішок ультратонкою плівкою хімічних абсорбентів, які наносять на інертний субстрат — подрібнене скло (скляну крупку). Перевагами плівкових уловлювачів у порівнянні з рідинними поглиначами є велика швидкість аспірації досліджуваного повітря і зручність застосування у польових умовах.

Для уловлювання з повітря високодисперсних аерозолів — димів, туманів, пилу — застосовують різні фільтруючі волокнисті матеріали, з яких найбільшою затримуючою здатністю, навіть для часток розміром $0,5\text{--}1\text{ нм}$, володіють фільтри з синьої та білої стрічки. Фільтри у вигляді диска закладають у металевий чи плексигласовий патрон. Швидкість протягання через них повітря практично необмежена і визначається потужністю аспіраційного приладу. Деякі типи аналітичних фільтрів, що знайшли широкого застосування, АФА подані у табл. 6.2[34].

Таблиця 6.2. — Аналітичні аерозольні фільтри

№ з/п	Марка	Технічна характеристика	Призначення
1	АФА-В	Виконані у вигляді кружків з опресованими краями, з перхлорвініло-вого фільтруючого матеріалу(тканина ФПП-15). Матеріал гідро-фобний, тому маса фільтрів залишається постійною та не залежить від вологості повітря. Фільтри випускають двох типорозмірів АФА-В-18 та АФА-В-10	Для визначення вагової концентрації аерозолі
2	АФА-ХС-18	Виготовляють з полістирольного гідро-фобного фільтруючого матеріалу, стійкого до кислот та лугів	Для мікрохімічного аналізу аерозолів, дисперсна фаза яких розчинна в лугах
3	АФАС-Р	Виготовляють з тканини ФПП, у внутрішній шар якої введено твердий сорбент з добавленням йоду	Для вловлювання парів та аерозолів, що містять ртуть

Існують і інші фільтри, перевагами яких є здатність одночасно ефективно уловлювати шкідливі речовини, що знаходяться у різних агрегатних станах — аеродисперсному і газоподібному, — з великими швидкостями просмоктування повітря при малій витраті часу.

Як основу для виготовлення таких фільтрів використовують тонковолокнистий фільтруючий матеріал ФП (фільтр Петроянова) і дрібно стовцевий сорбент, що вводять у внутрішні шари матеріалу. Сорбентами можуть служити різні марки активованого вугілля, подрібнений силікагель марки КСК і цеоліти марки NaX-13X. Ці сорбенти мають велику питому поверхню, хімічно інертні і мають високі адсорбційні властивості.

6.2. Основні поняття та визначення

Прилади газового аналізу — газоаналізатори (ГА) — складають найважливішу частину комплексу приладів контролю повітряного середовища. Основне призначення газоаналізаторів складається у визначенні концентрацій найбільш важливих для організму людини газів, що формують повітряне середовище. Газоаналітичні прилади важливі також у визначенні газового забруднення середовища мешкання, у виявленні в ній токсичних газових домішок, що являють собою загрозу здоров'ю людини,

тобто ці прилади знаходять застосування при розв'язанні задач контролю й охорони навколишнього середовища. Поряд з цим газоаналізатори використовуються у багатьох технологічних процесах і наукових дослідженнях, у тому числі при визначенні складу верхніх шарів атмосфери, що виконують важливу функцію у формуванні повітряного середовища, у якому живе і працює людина.

У більшості випадків задача аналізу газового складу полягає у вимірюванні концентрації якого-небудь одного (обумовленого) компонента складної газової суміші. Такий аналіз можливий тільки тоді, коли підлягаючий визначенню газ відрізняється від інших газів суміші, принаймні, яким-небудь одним фізико-хімічним параметром, що може бути використаний як вимірювана величина[3]. Очевидно, чим більше ця відмінність, тим точніше і чутливіше виявляється метод виміру. Тому вибір методу аналізу полягає у пошуку такого фізико-хімічного параметра обумовленого газу, за яким його відмінність від інших газів суміші виражена найбільшою мірою. Різноманіття фізико-хімічних властивостей газів і необхідність вибору вимірюваної величини із числа багатьох параметрів пояснюють як існування великої розмаїтості газоаналітичних приладів, так і неможливість у більшості випадків їхнього універсального застосування.

Газоаналізатори підрозділяються на автоматичні і керовані вручну. Ті й інші можуть бути стаціонарними, переносними і бортовими, тобто встановлюваними на борт дослідницьких ракет і інших літальних апаратів.

Основні характеристики газоаналізаторів такі.

1. **Тип газоаналізатора з указівкою фізичного параметра, що лежить в основі його роботи.**
2. **Вид аналізованого газу.** За цією ознакою розрізняють газоаналізатори на кисень, на двоокис вуглецю, на мікродомішки і т.д.
3. **Склад аналізованої суміші. Тут розрізняють:**
 - а) двокомпонентні (бінарні) суміші, один компонент яких є визначаемим, а інший — ні;
 - б) багатокомпонентні суміші, що складаються з одного визначуваного і декількох невизначуваних компонентів;
 - в) псевдобінарні суміші — багатокомпонентні суміші, у яких в процесі вимірів міняються концентрації лише двох компонентів, наприклад вміст кисню і двоокису вуглецю у вдихуваному і видихуваному повітрі.

4. **Діапазон вимірюваної величини.**
5. **Основна і додаткова похибки.**
6. **Інерційність газоаналізатора.**
7. **Вид вимірювальної схеми.**
8. **Габарити і маса приладу.**
9. **Енергоспоживання приладу.**

При газовому аналізі використовують об'ємні і масові одиниці виміру концентрації (вмісту) обумовленого компонента у суміші. Об'ємними (відносними) одиницями є відсотки (%), промілле (‰) і число об'ємних частин на мільйон (vpm). Результати вимірів, що виражаються у цих одиницях, показують частку об'єму, яку займає обумовлений компонент в аналізованій газовій суміші. Масовими одиницями є або маса обумовленого компонента в одиниці об'єму аналізованої суміші, наприклад міліграм на кубічний сантиметр, або безрозмірні одиниці, що визначають число масових частин обумовленого компонента на мільйон (ppm) чи на мільярд (ppb) масових частин аналізованої газової суміші. Об'ємні одиниці зручніше масових і тому більш поширені у газовому аналізі, оскільки відносний, наприклад, процентний, вміст обумовленого компонента не залежить від тиску і температури газу. При аналізуванні домішкових кількостей речовини використовують масові одиниці (найчастіше мг/м^3 і ppm), причому вказують їх агрегатний стан.

Основну і додаткову похибки ГА звичайно визначають у відсотках діапазону вимірів (%). Важливою характеристикою ГА, що визначає ступінь його придатності для аналізу динаміки зміни концентрації обумовленого компонента, є інерційність, під якою розуміють час, що пройшов з моменту зміни концентрації обумовленого компонента на вході приладу до моменту встановлення його показань; інерційність зазвичай вимірюють у секундах чи хвилинах.

Приблизна класифікація газоаналізаторів за видами фізичних параметрів газів, що обумовлюють роботу вимірювального перетворювача приладу, наведена у табл. 6.3.

Найбільшу зацікавленість з погляду контролю повітряного середовища й аналізу атмосферних забруднень представляють автоматичні ГА теплопровідності, магнітні на кисень, електрохімічні (гальванічні і деполізаційні), оптико-акустичні, що вимірюють поглинання світла у газів в ультрафіолетовій області спектра, і, нарешті, фотоколориметричні.

Таблиця 6.3. — Класифікація газоаналізаторів з указівкою їх призначення[3]

Механічні	Об'ємно-манометричні лабораторні ГА — вимірювання об'єму або тиску суміші при видаленні одного з її компонентів. Щільномірні (вагові, поплавкові, ефузійні, роторні) — вимірювання густини газової суміші. Акустичні лабораторні ГА — вимірювання поширення звукової хвилі у газовій суміші
Теплові	ГА теплопровідності (автоматичні) — вимірювання теплопровідності суміші. Термохімічні — вимірювання теплового ефекту реакції каталітичного окислення
Магнітні на кисень	Магнітомеханічні (роторні та магнітоєфузійні) полуавтоматичні ГА — вимірювання сил, що діють на діамагнітне тіло, оточене містячим кисень газом у магнітному полі. Термомагнітні автоматичні ГА — вимірювання інтенсивності термомагнітної конвекції кисню. Магнітні ГА теплопровідності — вимірювання теплопровідності у магнітному полі
Електричні	Іонізаційні ГА — вимірювання характеристик іонізації газової суміші. Електрохімічні автоматичні ГА: а) гальванічні та деполяризаційні — дослідження деполяризаційних властивостей кисню; б) кулоно- та кондуктометричні. Напівпровідникові, абсорбційні ГА — дослідження властивостей напівпровідників у процесі абсорбції або каталітичного окислення.
Оптичні	Інтерфераційні ГА. Спектрометричні автоматичні ГА — вимірювання спектрів висилання газів. ГА інфрачервоного поглинання — (оптико-акустичні) автоматичні, основані на вимірюванні характеристик поглинання газами інфрачервоного випромінювання. ГА ультрафіолетового поглинання — автоматичні, основані на вимірюванні поглиненого газом ультрафіолетового випромінювання. Фотоколориметричні (автоматичні) ГА — рідинні та стрічкові — вимірювання оптичних властивостей індикаторного розчину, реагуючого з газом, що аналізують.

6.3. Газоаналізатори теплопровідності

Теплові газоаналізатори належать до дуже поширених автоматичних ГА. Область їхнього застосування — від аналізу газів котельних установок до складу атмосфери космічних об'єктів. Основані ці ГА на вимірюванні теплових властивостей обумовленого компонента, що можуть служити мірою концентрації обумовленого компонента. Вимірюваними величинами служать: а) теплопровідність суміші у ГА теплопровідності; б) корисний тепловий ефект реакції каталітичного окислювання в термохімічних ГА.

Найбільшого поширення у газоаналітичних вимірах набули ГА теплопровідності (ГАТ).

Принцип дії ГАТ заснований на тому, що температура, а отже, опір R провідника, що нагрівається постійним за величиною струмом, залежить при дотриманні відповідної умови: теплопровідності газового середовища, що оточує цей провідник. Якщо теплопровідність визначуваного компонента суміші значно відрізняється від теплопровідності невизначуваних компонентів, то теплопровідність суміші буде в основному визначатися концентрацією визначуваного компонента. Чим більше це розходження у теплопровідності визначуваних і невизначуваних компонентів, тим вище чутливість ГА. Очевидно також, що якщо безпосередньо вимірюваною величиною ГАТ є опір провідника, охолоджуваного аналізованим газом, то для збільшення чутливості приладу необхідно для його провідника (чутливого елемента) вибирати матеріал з великим тепловим коефіцієнтом опору αR .

Прямі виміри теплопровідності газів, що складають природну і штучні атмосфери (табл. 6.4), показують, що метод теплопровідності найбільш часто застосовують для виміру вмісту водню, гелію і кисню у повітрі чи у сумішах, що містять азот або кисень.

Таблиця 6.4. — Параметри теплопровідності деяких газів[3]

Газ	Теплопровідність при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10^3\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$	Відношення до теплопро- відності повітря	Коефіцієнт теплопровідності, 10^4 град^{-1}
Повітря	244	1,0	28
Водород	17	7,15	27
Гелій	1460	5,97	18
CO ₂	146	0,605	48
Кисень	246	1,014	28
Азот	243	0,996	28

Однак слід зазначити, що за допомогою ГАТ, які мають високочутливі електронні схеми, можна аналізувати і ті двокомпонентні суміші, теплопровідності компонентів яких мало відмінні один від одного.

Застосування методу теплопровідності для аналітичних цілей засновано на тому, що між теплопровідністю суміші і теплопровідностями її окремих компонентів є залежність, з достатнім ступенем точності виражена формулою[3]:

$$\lambda_{\text{см}} = C_{1\lambda 1} + C_{2\lambda 2} + \dots + C_{n\lambda n} = \sum_{i=1}^n C_{i\lambda i} \quad (6.1)$$

де C_i — концентрація i -го компонента суміші у частках одиниці; λ_i — його теплопровідність. Схема вимірювального перетворювача наведена на рис. 6.5[3].

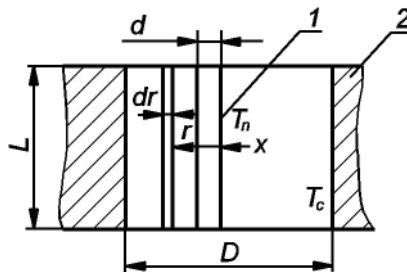


Рис. 6.5. Схема вимірювального перетворювача ГАТ: 1 – провідник з струмом; 2 – корпус (стінка); T_n – температура провідника; d – його діаметр; T_c – температура стінки; D – діаметр отвору; L – довжина.

У сучасних ГАТ застосовують вимірювальні перетворювачі, нагрівальні елементи яких для забезпечення їх стійкості в агресивному газовому середовищі покриті оболонкою з кварцового скла.

Матеріал нагрівального елемента повинен бути хімічно стійким у газових середовищах, що містять кисень та водень; мати велике значення теплового коефіцієнта опору αR . Таким вимогам задовольняють платина ($\alpha R = 3 \cdot 10^{-3}$), вольфрам, тантал, нікель. Вимірювальні перетворювачі ГАТ виконують у двох варіантах: відкритого типу, який обдувається газом, що аналізують, та закритого, який заповнюють порівняльним (еталонним) газом. Конструкції їх наведені на рис 6.6[3].

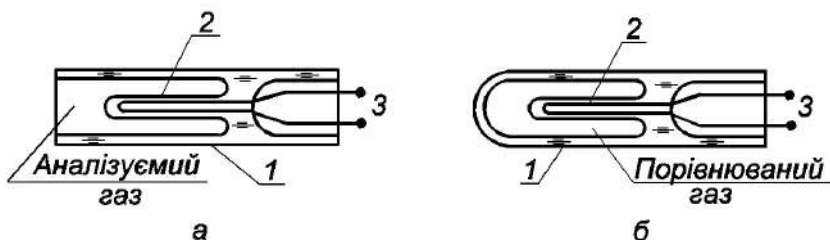


Рис. 6.6. Вимірювальні перетворювачі ГАТ: а) відкритого; б) закритого типів: 1 — скляний корпус; 2 — нагрівальний елемент у вигляді покритої склом платинової проволочки діаметром 0,02 мм; 3 — струмовідводи діаметром 0,15 мм.

Найпростіша електрична схема включення чутливих елементів ГАТ являє собою міст, що живиться постійним за величиною струмом (рис. 6.7) [3].

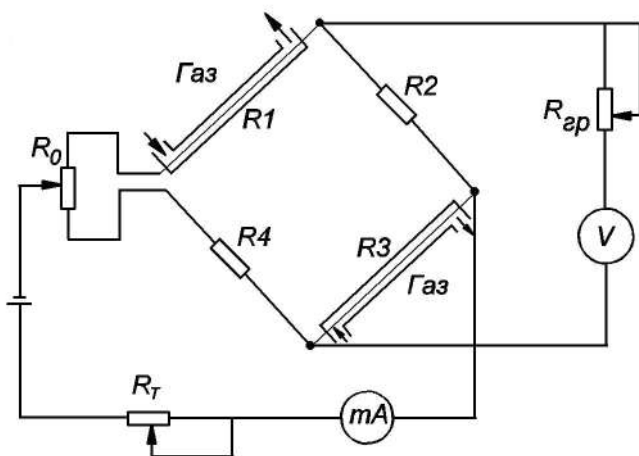


Рис. 6.7. Електрична схема найпростішого ГА теплопровідності: R1 та R3 — вимірювальні перетворювачі відкритого типу, що омиваються вимірюємою газовою сумішшю; R2 та R4 — порівняльний елемент закритого типу, заповнений газом, склад якого відповідає нижній межі вимірювання ГА; R_0 — нульовий реостат, який призначений для установки рівноваги мосту при відсутності визначаємого компонента у вимірюваній суміші; R_m та mA (міліамперметр) призначені для регулювання величини струму живлення мосту; показання ГА зчитуються з вольтметра V; регулювання та калібрування шкали приладу здійснюється за допомогою градувального резистора R_{gr} .

6.4. Магнітні газоаналізатори

Принцип дії магнітних ГА оснований на вимірюванні параметрів, пов'язаних з магнітними властивостями аналізованих газів. Газовий аналіз сумішей магнітними методами можливий, якщо магнітні властивості визначуваного компонента розрізняються з магнітними властивостями інших (невизначуваних) компонентів суміші.

Магнітні властивості газів характеризуються об'ємною χ_v та питомою χ магнітною сприйнятливістю, пов'язаних співвідношенням[3]:

$$\chi_v = \chi \sigma, \quad (6.2)$$

де σ — густина газу; χ_v — інтенсивність намагнічування газу при цій напруженості зовнішнього магнітного поля; вона залежить від густини, тобто від тиску та температури газу.

Величина об'ємної магнітної сприйнятливості пов'язана з магнітною проникливістю μ співвідношенням:

$$\chi_v = (\mu - 1)/4\pi. \quad (6.3)$$

За своїми магнітними властивостями гази поділяють на діамагнітні, в яких

$$\chi_{v\text{дм}} = \chi_{\text{дм}} \sigma, \quad (6.4)$$

причому $\chi_{v\text{дм}}$ (об'ємна магнітна сприйнятливість діамагнетика) < 0, та парамагнітні, в яких

$$\chi_{v\text{пм}} = (K / (T + \Delta)) \cdot \sigma > 0 \quad (6.5)$$

У парамагнітних газів питома магнітна сприйнятливість

$$\chi_{\text{пм}} = K / (T + \Delta) \quad (6.6)$$

визначається значенням постійної Кюри — Вейса K і величиною поправки Δ та залежить від температури, а у діамагнітних газів $\chi_{\text{дм}}$ не залежить від неї.

Більшість газів є діамагнетиками, у той же час як кисень має яскраво виражені парамагнітні властивості. Тому концентрація кисню визначає χ_v суміші практично незалежно від вмісту та складу інших її компонентів, тому можна вважати, що $\chi_{v\text{всм}} \approx \chi_{v\text{O}_2}$ приблизно дорівнює об'ємній магнітній сприйнятливості кисню при тиску суміші $P_{\text{сум}}$, помножений на його концентрацію у частках одиниці.

Парамагнітні властивості кисню дозволяють вести вибіркові виміри його концентрації у газових сумішах складного складу навіть при малих значеннях її (до 0,1%). Тому всі магнітні ГА є газоаналізаторами на кисень.

Магнітні ГА на кисень поділяються на магнітомеханічні (ММГА) — роторні ефузійні та на термомагнітні (ТМГА).

Відносне значення питомої магнітної сприйманості деяких газів (по відношенням до кисню) наведені у табл. 6.5[3].

Таблиця 6.5. — Відносні значення питомої магнітної сприйманості деяких газів

Газ	Магнітна сприйманість (за відношенням до кисню)	Газ	Магнітна сприйманість (за відношенням до кисню)
Кисень	+1	CO ₂	-0,0057
Гелій	-0,00057	Повітря	+0, 21
Водень	-0,0011	H ₂ O (пар)	-0,004
Азот	-0,004	NO	+0,362

Робота ММГА основана на вимірюванні сил, діючих на тіло, поміщене в неоднорідне магнітне поле та оточених газовою сумішшю, що містить кисень. Важливою властивістю цих приладів є майже пряма залежність їх показань від концентрації кисню у суміші. Але оскільки магнітні параметри суміші залежать від її температури та тиску, потрібна жорстка стабілізація цих параметрів або введення у ММГА компенсуючих пристроїв. Чутливість ММГА досягає 0,1%, вони працюють при малих витратах суміші. Їх недоліками є: необхідність у сильних постійних магнітах, що збільшує масу приладу та наявність рухливих роторів і оптичних систем, що утруднює експлуатацію приладу в динамічних умовах та потребує його юстування. Цього недоліку значною мірою позбавлені магнітні ГА ефузійного типу (МЕГА), їх ще називають магнітомеханічні безроторні ГА.

Термомагнітні (ТМГА) також основані на використанні механічних переміщень газу у магнітному полі, але відрізняються тим, що градієнт магнітної сприйнятливості середовища отримується в результаті нагрівання частини аналізуемого газу в зоні неоднорідного магнітного поля. За формулою Ланжевена питома магнітна сприйнятливості парамагнітного кисню різко зменшується зі зростанням температури $\chi_{\text{O}_2} = K/T$. Тому вимірювальний перетворювач являє собою магнітну систему, між полюсами якої розміщено нагрітий струмом терморезистор. Аналізований парамагнітний газ, стикаючись з терморезистором, частково втрачає свої магнітні

властивості та виштовхується з магнітного поля більш холодним газом. Таким чином, навколо терморезистора, що нагрівається, виникає безперервний потік газу, який викликає його охолодження. Цей потік називають термомагнітною конвекцією або магнітним вітром. Інтенсивність цього явища залежить від величини χ_{VO_2} , визначаємо його парціальним тиском у суміші, та вимірюється, як і у ГА теплопровідності, за величиною викликаного нею охолодження провідника.

Чутливі елементи вимірювальних перетворювачів ТМГА, призначених для вимірювання інтенсивності термомагнітної конвекції, виконують з покритої склом платинової проволочки. Вони бувають як з *внутрішньою*, так і з *зовнішньою* конвекцією. Елементи з *внутрішньою* конвекцією забезпечують мінімальну залежність показань від температури та властивостей невизначаних компонентів та малу похибку при живленні стабільним струмом, їх застосовують в основному для вимірювання великих концентрацій кисню. Недолік — велика інертність.

Елементи з *зовнішньою* конвекцією та відкритою спіраллю мають мінімальну інерційність, але показання приладу залежать від теплопровідності суміші, що потребує стабілізації тиску суміші та її початкової температури. Зазвичай їх використовують для аналізу малих концентрацій кисню у схемах з дифузійним напуском.

Елементи з *зовнішньою* конвекцією, але з закритою (покритою склом) спіраллю мають проміжні значення інерційності та порівняно малу залежність показань від тиску та температури. Застосовують їх для вимірювань середніх значень концентрації кисню. Схеми чутливих елементів вимірювальних перетворювачів з зовнішньою конвекцією наведені на рис. 6.8[3].

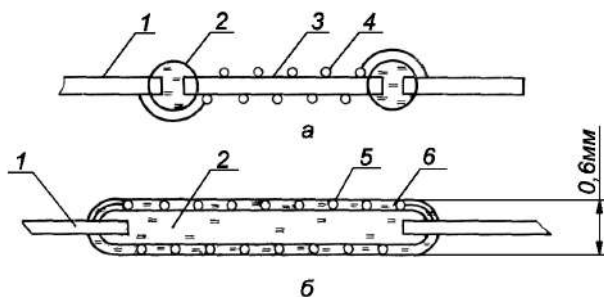


Рис. 6.8. Схеми чутливих елементів ТМГА із зовнішньою конвекцією: а — з відкритою; б — закритою спіраллю; де 1 — тримач-токопровід(сталь); 2 — скляний ізолятор; 3 — оправка (сталь); 4 — покритий склом дріт; 5 — не покритий склом дріт (платина); 6 — зовнішнє заскління

Магнітні газоаналізатори з використанням ефекту термомагнітної конвекції на основі кільцевої камери з чутливими елементами та внутрішньою конвекцією використовують для аналізування великих концентрацій кисню (80–100%). Вони є простими у конструктивному відношенні, але мають велику інерційність та порівняно низьку чутливість і вимагають стабілізації початкової температури газу, його тиску та витрати.

6.5. Електрохімічні газоаналізатори

Дія електрохімічних газоаналізаторів спирається на вимірюванні однойменних параметрів рідини, в якій розчинено газ, що аналізують. Ці ГА призначені для вимірювання малих (до 20 об. %) концентрацій кисню в повітряних сумішах та розділяються на гальванічні і деполяризаційні.

Конструкції гальванічних ГА дуже прості (допускають малогабаритне виконання). Вони мають достатньо високу чутливість та значний динамічний діапазон. Найбільш суттєвим недоліком є велика температурна похибка вимірювань (до 2,5% на 1 °C). Крім того, тривале застосування приладів потребує підтримання постійного складу електроліту та заміни анода, граничний термін служби якого не перевищує декількох сотень годин.

Відмічений вище недолік гальванічних ГА, що полягає у необхідності періодично змінювати анод та електроліт, усунуто в деполяризаційних приладах, побудованих на інертних (часто однорідних) електродах, занурених у слабкий розчин солі, наприклад у Na_2SO_4 . Якщо від зовнішнього джерела подавати напругу на електроди, то до негативно зарядженого аноду рухаються катіони, натрію та водню й на його поверхні виділяється водень. До катоду дрейфують аніони SO_4^{2-} та OH^- причому виділення останніх залежить від присутності кисню в приелектродному шарі.

У відсутності кисню відбувається блокування поверхні катоду аніонами, електрод поляризується, та струм через елемент зменшується. Якщо в електроліті присутній кисень, то вже при малих позитивних потенціалах він зв'язує іони OH^- з утворенням води, викликаючи тим часткову деполяризацію електроду та збільшенням струму у зовнішньому ланцюгу.

Залежність струму через елемент від концентрації кисню робить можливими та достатньо зручними вимірювання в межах від 0 до 10%-вої концентрації за об'ємом, що дозволяє проводити аналіз кисню у різних сумішах. Проте деполяризаційним ГА притаманні недоліки, властиві гальванічним приладам, крім того, їх похибка є дуже великою — до 10% верхньої межі вимірювання.

Важливою особливістю електрохімічного методу газового аналізу є його застосованість для виявлення домішкових концентрацій токсичних з'єднань сірки — сірководню (H_2S) і двоокису сірки (SO_2) у повітряному середовищі. У таких газоаналізаторах одержали поширення різні системи «електроди — електроліт». Для визначення концентрацій SO_2 у повітрі у наступних приладах використовують кілька методик. Першою з розглянутих є використання абсорбції сіркового газу розчином йоду з утворенням у результаті окислювально-відновної реакції іонів йоду I^- , концентрація яких вимірюється йодоіонним електродом. Вимірюваною величиною є вихідна напруга елемента, складеного з йодоіонного і порівняльного електродів, що залежить від концентрації, тобто від кількості SO_2 адсорбованого електролітом. Прилад забезпечує малу похибку вимірів — усього 2% — при постійності складу електроліту, його температури і водневого показника (РН) й при досить малих витратах газу (кілька метрів у хвилину) та електроліту — від 0,5 до 1 мл/хв.

В іншому приладі, який призначений для виміру концентрації SO_2 у повітрі, використовують залежність від електропровідності розчину. У цьому випадку аналізований газ пропускають через абсорбуючий розчин перекису водню в сірчаній кислоті. Двоокис сірки, що міститься в газі, взаємодіючи з перекисом водню, утворює сірчану кислоту, у результаті чого концентрація її збільшується й електропровідність розчину зростає.

Для аналізу сірководню у повітрі використовують метод, заснований на електрохімічному окислюванні його до сірчаної кислоти. Важливість аналізу цього з'єднання в повітрі обумовлюється як його токсичністю, так і кородуючою дією. Електрохімічне окислювання H_2S проводиться за допомогою дифузійного електрода на фторопластовій основі, що знаходиться під постійною напругою близько 1,5 В стандартного водневого електрода. Вимірювальний перетворювач ГА складається з трьох дифузійних електродів — вимірювального, протиелектрода й електрода порівняння, поміщених у 28%-вий розчин сірчаної кислоти. Вимірюваною величиною є струм, утворюємий у вимірювальному перетворювачі. Чутливість приладу складає від 10^{-6} до $3 \cdot 10^{-6}$ ppm.

Відомі також іонізаційні ГА, що належать як і електрохімічні, до електричних ГА. Ці ГА дозволяють вести аналіз мікроконцентрацій з'єднань, що володіють високою електронною спорідненістю, до яких належать насамперед кисень, двоокис сірки і галогенвмісні з'єднання. Принцип дії вимірювальних перетворювачів таких ГА аналогічний роботі електронно-захоплюючого детектора газового хроматографа.

6.6. Оптичні газоаналізатори

До оптичних ГА належить велика група приладів, заснованих на використанні залежності одного з оптичних властивостей аналізованої суміші від концентрації компонента, який визначають. Очевидно, що для однозначного розв'язання задачі газового аналізу тут потрібна така ж залежність оптичного параметра визначаємого компонента від його концентрації.

За видом вимірюваного параметра розрізняють оптичні ГА, засновані на вимірюванні[3]:

- а) коефіцієнта переломлення газового середовища — газоінтерферометри;
- б) параметрів поглинання променистої енергії в ультрафіолетовій (УФ) і інфрачервоної (ІЧ) областях спектра — газоаналізатори УФ- і ІЧ-поглинання;
- в) параметрів спектрів випускнення газів — спектрофотометричні газоаналізатори;
- г) оптичних властивостей рідини, з якою прореагував газ, — фотоколориметричні газоаналізатори.

Серед перерахованих приладів найбільш широке застосування знайшли газоаналізатори ІЧ- та УФ-поглинання і фотоколориметричні прилади, щонайкраще пристосовані для розв'язання задач контролю газового складу повітряного середовища й аналізу його забруднень. Що стосується газоінтерферометрів і спектрофотометрів, то їх використовують для розв'язання вузького кола задач, пов'язаних із проблемою контролю повітряного середовища, наприклад, таких як вибірковий аналіз інертних газів, метану і етилену в повітрі.

Поглинання газом променистої енергії приводить до змін енергетичного стану атомів, молекул та їхніх груп, причому характер і ступінь цих змін залежать від енергії поглиненого випромінювання. Зокрема, поглинання енергії в ІЧ-області спектра зв'язано з внутрішньо-молекулярними переходами, обумовленими обертальними рухами всередині молекул та їхніх груп. Здатністю поглинати ІЧ-випромінювання володіють гази, молекули яких складаються з двох і більш (крім кисню, азоту і водню). Інтенсивність радіації, що пройшла через газ (I_λ), описується законом Ламберта — Бера[3]:

$$I_\lambda = I_{\lambda_0} \exp - \varepsilon_\lambda CL, \quad (6.7)$$

де I_{ω} — інтенсивність падаючої радіації на даній довжині хвилі випромінювання λ ; ϵ_{λ} — коефіцієнт поглинання енергії на цій довжині хвилі; C — концентрація поглинаючого газу; L — довжина шару поглинаючого газу.

Дослідження ІЧ-спектрів поглинання газів та їхніх сумішей показує, що поглинаючі ІЧ-радіацію газу (наприклад, окис і двоокис вуглецю) мають свої характерні спектри поглинання (рис. 6.9) [3].

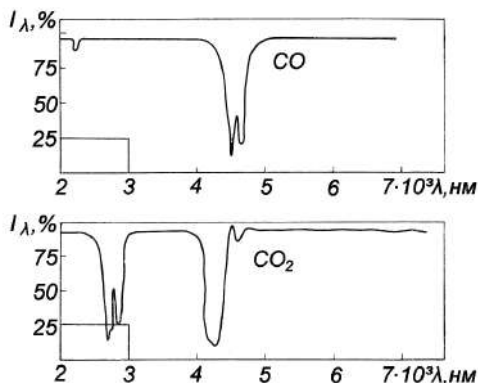


Рис. 6.9. ІЧ-спектри поглинання окису(на горі) та двоокису вуглецю(внизу)

Розходження у спектрах поглинання, а також залежність поглинання від концентрації газу дозволяє вести вибіркового аналіз обумовленого (поглинаючу радіацію) компонента в складних газових сумішах. Труднощі методу полягають у тому, що для більш складних (за молекулярним складом) газів характерні близькі за будовою або ж такі, що частково перекривають один одного спектри поглинання. У цьому зв'язку метод ІЧ-поглинання знаходить практичне застосування лише для аналізу порівняно простих газів (наприклад, CO та CO₂) у сумішах, невизначаємі компоненти яких не поглинають ІЧ-радіації (наприклад, у повітрі).

У схемі, що застосовується в більшості сучасних приладів, камера приймача променів заповнюється будь-яким газом, що поглинає ІЧ-радіацію у досліджуваній області спектра або аналізуєним газом і герметизується. Перетворювальним елементом приймача променів є конденсаторний мікрофон, мембрана якого, що являє собою стінку герметизованого об'єму, разом з нерухомим електродом підключається до входу підсилювача. Робота приймача променів у цій схемі полягає у такому. Коли модульоване випромінювання (інтенсивність якого зворотно-пропорційна концентрації поглинаючого ІЧ випромінювання визначаємого компонента в аналізованій

суміші, тобто зворотно-пропорційна ступеню поглинання у вимірювальній камері) потрапляє в камеру приймача променів, той газ, що знаходиться в ній, поглинаючи радіацію, нагрівається (зміну його температури складає ΔT), що приводить, у свою чергу, до підвищення тиску газу в приймачі променів на ΔP .

Зміна тиску, яка відбувається з частотою, що дорівнює частоті модуляції потоку енергії, реєструє мембрана конденсаторного мікрофону, та на вході підсилювача з'являється змінний електричний сигнал, амплітуда якого прямо пропорційна випроміненню, поглиненому у приймачі променів, та зворотно пропорційна радіації, поглиненій у вимірювальній камері та концентрації визначаемого компонента.

Чутливість приймача променів, що визначає чутливість усього приладу, залежить від об'єму його камери, концентрації поглинаючого газу в ній і довжини камери приймача, на сьогодні досягає 10^{-4} Вт/см². Ефект, що полягає у зміні тиску під дією ІЧ-радіації, що падає на приймач променів, називають оптико-акустичним ефектом; у зв'язку з цим газоаналізатори ІЧ-поглинання, оснащені такими приймачами променів, називають *оптико-акустичними* (ОА).

Вікна камер, приймачів променів і об'єкторів ОА газоаналізаторів виконують з матеріалів, що пропускають ІЧ-радіацію у заданому діапазоні довжин хвиль, наприклад, із флюориту CaF_2 , броміду калію KBr , фториду літію LiF , що істотно підвищує вартість приладів. Пари води інтенсивно поглинають ІЧ-радіацію і впливають на результати аналізу. Щоб усунути цей вплив, а заодно підвищити ступінь прозорості вікон, осушують газ, що подається у вимірювальну камеру, і герметизують оптичну схему приладу.

Електронна схема оптико-акустичного ГА складається з підсилювача перемінної напруги (звичайно селективного), настроєного на частоту модуляції з високим вхідним опором, демодулятора та реєструючого приладу, що є — самописця, цифрового вольтметра і т.п.

Оптико-акустичні приймачів променів, використовувані у ГА, мають гарну вибірковість, що обумовлено вибіркоvim поглинанням газу, який заповнює приймачів променів, і, як наслідок цього, забезпечують високу чутливість вимірів у заданому діапазоні довжин хвиль. Застосовувати інші приймачі випромінювання, використовувані у ІЧ-техніці, наприклад напівпровідникові болометри, вакуумні термопари, лавинні ІЧ-діоди й інші складно, тому що ці приймачі забезпечують високу чутливість вимірів лише при монохроматичності потоку падаючого випромінювання.

Дійсно, якщо спектр джерела випромінення $I_{\text{ол}}$ лежить у межах довжин хвиль від λ_0 до λ_m , а спектр поглинання газу, що аналізують, займає порівняно вузьку область $\lambda_1 - \lambda_2$ у межах спектра джерела випромінювання, то ширококутовий приймач навіть при повному поглинанні газом енергії випромінювання буде виробляти сигнал, пропорційний інтенсивності випромінювання джерела в діапазонах довжин хвиль $\lambda_0 - \lambda_1$ і $\lambda_2 - \lambda_m$. Зміни концентрації поглинаючого газу в цьому випадку викликають лише малі відносні зміни вихідного сигналу приймача випромінювання, що часто не піддаються задовільній реєстрації. Якщо ж за допомогою якого-небудь пристрою зі спектра випромінювача виділяється діапазон довжин хвиль, що відповідає спектральній характеристиці поглинання аналізованого газу, тобто $\lambda_1 - \lambda_2$, то співвідношення сигнал — шум на виході приймача збільшується і зростає чутливість вимірів.

Для газового аналізу можна використовувати ІЧ-спектрофотометри, у комплекті з газовими кюветами. Висока чутливість цих приладів, з сильними джерелами світла, монохроматорами і чутливими електрооптичними приймачами випромінювання, дозволяє застосовувати ці прилади для визначення малих концентрацій поглинаючих ІЧ-радіацію газів у різних газових сумішах і для аналізу багатьох атмосферних забруднень. Приклади таких сучасних приладів наведені у додатку 5.

Підводячи підсумок зазначимо, що оптико-акустичні ГА мають високу чутливість, великий динамічний діапазон і порівняно малу похибку вимірів. Джерелами похибок є в основному коливання температури, живлячих напруг і неповна ідентичність елементів оптичної схеми у робочому і порівняльному каналах. Значну частину об'єму і маси приладу займають блоки підготовки газу до аналізу, в яких аналізована суміш очищається, осушується і термостабілізується та пристрою термостабілізації елементів оптичної схеми.

Розглянутий вище оптико-акустичний ефект має місце і при поглинанні газом енергії ультрафіолетового випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 200 до 400 нм, однак тут він виражений значно слабший.

УФ-випромінення впливає на гази в таким чином[3]:

- а) поглинання його одноатомними газами (парами) викликає перехід атомів у збуджений стан; при цьому спектр поглинання має лінійчастий характер (рис. 6.10, а);
- б) при поглинанні енергії випромінювання двоатомними газами спектр також має лінійчастий характер, але має також і характерні ділянки суцільного поглинання (рис. 6.10, б);

- в) багатоатомні гази (і пари) мають спектр, що містить велику кількість ліній і смуг, у зв'язку з чим їхній вибірковий аналіз (навіть у простих сумішах) виявляється важко виконуваним.

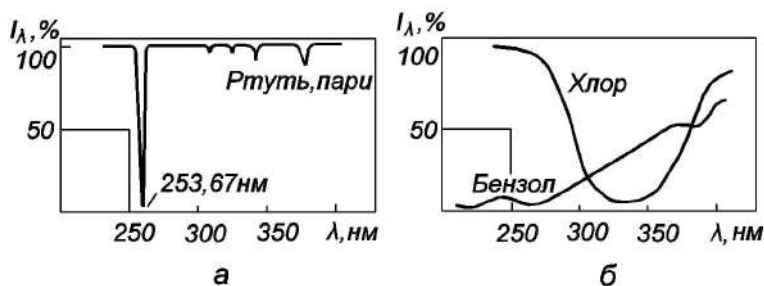


Рис. 6.10. Спектри поглинання деяких газів в УФ-області спектру.

Метод газового аналізу при поглинанні УФ-випромінювання застосовують лише для аналізу одноатомних газів і парів, що мають характерну сильну лінію в спектрі поглинання (наприклад, парів ртуті) у складних сумішах або двоатомних газів (наприклад, галогенів) у досить простих сумішах, функціональна схема такого аналізатора наведена на рис. 6.11[3].

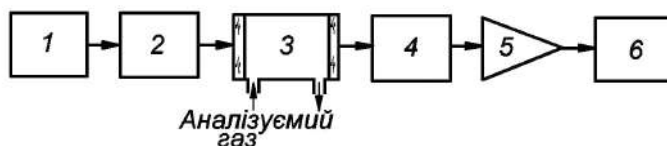


Рис. 6.11. Функціональна схема газоаналізатора УФ-поглинання: 1 — джерело випромінювання; 2 — набір світлофільтрів; 3 — вимірювальна камера; 4 — приймач випромінювання; 5 — підсилювач; 6 — реєструючий прилад

Як джерела випромінювання застосовують ртутно-кварцові і ртутно-кадмієві лампи, спектр випромінювання яких має лінійчатий характер, а також водневі і ксенонові лампи, що мають суцільний спектр в УФ-області випромінювання. Для виділення робочої області довжин хвиль у спектрі випромінювання світло від джерела пропускають через набір світлофільтрів. Для цієї мети в УФ (і видимій) області спектра використовують інтерференційний чи абсорбційний (скляний) світлофільтр, що володіє різними спектральними характеристиками поглинання, обумовленими маркою

матеріалу, з якого виготовлений світлофільтр, і різними інтенсивностями поглинання, обумовленими товщиною світлофільтра. Застосування наборів з так званих схрещених світлофільтрів дозволяє у більшості випадків виділяти досить вузьку область довжин хвиль, яка є відповідною області поглинання аналізованого газу.

Наявність світлофільтрів дозволяє досягати високої чутливості вимірів при використанні широкосмугових приймачів випромінювання і стандартних (часто широкосмугових) випромінювачів. У той же час через значне поглинання енергії світлофільтрами потрібні потужні джерела випромінювання — ксенонові лампи типу ДКСШ чи ртутно-кварцові лампи типів ПРК, ДРШ-100, ДРШ-250 і ін.

Чутливість методу і його вибірковість багато в чому залежать від вибору робочої довжини хвилі й інтенсивності її у спектрі джерела випромінювання. Так, при аналізі парів ртуті робоча довжина хвилі складає 254 нм, при цьому чутливість досягає $10^{-6}\%$; при роботі на хвилі довжиною 365 нм чутливість різко зменшується (рис. 6.10, а).

Як приймачі випромінювання в приладах УФ-поглинання застосовують фотоелементи, фоторезистори, спектральна характеристика чутливості яких максимальна в робочій області довжин хвиль. Важливим параметром приймача випромінювання, що визначає чутливість приладу, є його темновий струм (I_m), що складає від 10^{-7} до 10^{-9} А. Всі оптичні елементи приладів УФ-поглинання виконують із кварцового скла, яке пропускає світло в УФ-області. Сучасні газоаналізатори УФ-поглинання, як і оптико-акустичні прилади, будують по двоканальним схемам, що знижує похибку виміру. Вони мають високу чутливість: 1–2% діапазону вимірів, не вимагають жорсткої термостабілізації, але придатні для аналізу невеликої кількості газів (парів).

Останнім часом усе більше застосування у спектральному аналізі знаходить оптико-акустичний ефект, що з різною інтенсивністю виявляється як у ІЧ-, і в УФ- і у видимій областях спектра. Цей спосіб важливий тим, що дозволяє аналізувати склад непрозорих зразків без їхнього руйнування.

Прилади з оптико-акустичними приймачами, призначені для спектральних досліджень, називають **фотоакустичними спектрометрами**. При аналізуванні зразок поміщають у герметичну камеру, заповнену непоглинаючим випромінювання газом і забезпечену конденсаторним мікрофоном. У процесі вимірів зразок опромінюють монохроматичним світлом зі змінюваною довжиною хвилі від досить потужного модульованого

джерела випромінювання. Спектр поглинання зразка реєструється у виді залежності амплітуди сигналу конденсаторного мікрофона від довжини хвилі світла, що подають на зразок.

Великий інтерес з погляду аналізу домішкових газів (у тому числі газових забруднень атмосфери) представляють **фотоколориметричні (ФК) газоаналізатори**. В основі їхньої роботи лежить кольорова вибіркова реакція хімічної взаємодії між обумовленим компонентом і індикаторним розчином. Вона характеризується утворенням у розчині кольорових пофарбованих комплексів, що змінюють його оптичну густину. Концентрація цих комплексів, а отже, і кількість газу, що прореагував, визначають методом поглинання світла.

Фотоколориметричний метод має такі особливості:

- а) чутливість методу може бути дуже високою, тому що прокачування великих об'ємів газової суміші через розчин дозволяє накопичувати в ньому аналізований компонент, хоча при цьому і зростає час аналізу;
- б) метод відрізняється високою вибірковістю, що визначається специфічністю реакції (тобто підбором складу індикаторного розчину);
- в) цей метод, єдиний у газовому аналізованні, допускає створення досить універсального приладу на основі використання різних індикаторних розчинів, що призначаються для визначення різних газів;
- г) похибка методу досить висока, що визначається його залежністю від таких характеристик реакції, як швидкість, температура, тривалість контакту реагуючих речовин.

Завдяки перерахованим перевагам ФК-прилади застосовуються для визначення малих кількостей багатьох домішкових газів (парів) у складних газових сумішах.

ФК-газоаналізатори поділяють на рідинні та стрічкові. Робота з рідким детектором полягає у порівнянні двох світлових потоків від одного джерела світла, що пройшли через дві однакові кювети, в одній з яких знаходиться чистий індикаторний розчин, а іншій — розчин, з яким прореагував аналізований компонент суміші. Реакція, в результаті якої змінюється оптична густина розчину, відбувається в абсорбері, через який прокачується газ, який аналізують.

Чутливість методу при безперервній подачі розчину визначається в основному ступенем абсорбції компонента, що визначають, та співвідношенням швидкостей подачі газу та розчину в абсорбер[3]:

$$\psi_{\lambda} = B\alpha Q_{\Gamma} / Q_p, \quad (6.7)$$

де α — ступінь абсорбції; (Q_{Γ} и (Q_p — витрати газу та розчину; B — коефіцієнт пропорційності.

Чутливість рідинних ФК-приладів складає 0,01 мг/л, або 8 vpm при запізненні показань на 5–8 хв, а основна похибка — 20%.

Значно більшу чутливість (на один-два порядку вище чутливості рідинних газоаналізаторів), але і більшу похибку (25%) мають стрічкові **ФК-газоаналізатори**, де вимірюється світлопоглинання ділянки паперової або текстильної стрічки, просоченої індикаторним розчином, який вступає в реакцію з визначаємим компонентом аналізуємої суміші, яку продувають через стрічку.

6.7. Хроматографи та мас-спектрометри

Хроматографія — один із найбільш універсальних методів аналізу речовин складного складу, що знаходяться у газовій чи рідкій фазі. Цей метод заснований на вибірковій сорбції якого-небудь компонента, що входить до складу речовини. Розрізняють два види сорбції — **абсорбцію**, під якою розуміють вибіркове поглинання компонента з газової фази рідиною або твердим абсорбентом, і **адсорбцію** — сорбцію речовини на поверхні розділу газ — рідина, газ — тверде тіло і рідина — тверде тіло. Сорбуюча речовина в цьому випадку називається **адсорбентом**.

Універсальність хроматографії як методу аналізу складних за складом речовин можна порівняти з мас-спектрометрією, що являє собою визначення компонентів речовини на рівні елементарних часток. Методи і прилади газової хроматографії дозволяють з високою точністю вести аналіз газового складу повітряного середовища і різних атмосферних забруднень.

Хроматографічним процесом називається процес, заснований на переміщенні дискретної зони речовини уздовж шару сорбенту в потоці рухливої фази і пов'язаний з багаторазовим повторенням сорбційних і десорбційних актів. Хроматографічний процес найчастіше здійснюється в колонках, заповнених твердим чи рідким сорбентом — нерухомою фазою, через які пропускають аналізовану речовину, наприклад газову суміш, що є рухливою фазою. У газовій хроматографії рухливою фазою є газ або пара. У газоадсорбційній хроматографії нерухомою фазою служить сорбент, а у газорідинній — рідина, нанесена на твердий носій. Газоадсорбційна і газорідинна хроматографії є варіантами газової хроматографії.

До переваг газової хроматографії належать:

- а) можливість ідентифікувати і кількісно визначати індивідуальні компоненти складних сумішей газів або парів;
- б) можливість аналізувати широке коло об'єктів — від легких газів до високомолекулярних органічних сполук;
- в) можливість досліджувати мікропроби.

Особливості газової хроматографії: висока ефективність поділу і мала тривалість процесу, обумовлені низькою в'язкістю рухливої фази, а також можливість здійснення автоматичного запису й обробки отриманих результатів.

Якщо хроматографічний аналіз проводиться для складної (у найпростішому випадку — двокомпонентної) газової чи парогазової суміші, ступінь сорбції різних компонентів якої обраним сорбентом різна, то результатом процесу є поділ суміші на її складові, які обумовлені розходженнями часі утримання компонентів суміші шаром сорбенту. У цьому випадку з'являється можливість окремо реєструвати компоненти суміші на виході з хроматографічної колонки.

Залежно від способу переміщення аналізованих речовин уздовж шару сорбенту розрізняють такі методи (варіанти) газохроматографічного процесу, як виявляючий, фронтальний і витіснювальний.

Виявляючий (елюційний) метод полягає у тому, що аналізуємої речовини переносяться через сорбційний шар потоком речовини (елюента), яка сорбується гірше будь-якого з компонентів аналізуємої суміші. У газовій хроматографії як елюенти використовують різні гази, що мають назву газів-носіїв. Цей метод аналізу отримав найбільшого поширення, його основні переваги полягають у такому:

- а) сорбент безперервно регенерується газом-носієм, тому після виходу розділених компонентів суміші може бути почато розділення наступної проби;
- б) при виборі відповідних умов компоненти можуть бути практично повністю відділені один від одного та будуть знаходитись лише у суміші з газом-носієм, що полегшує реєстрацію хроматограми.

Фронтальний метод полягає у безпосередньому пропусканні суміші, що досліджується, через шар сорбенту. У результаті на сорбенті утворюються зони, які містять послідовно зростаючу кількість компонентів, а в його кінці порція, склад якої відповідає складу початкової суміші.

Переваги фронтального методу — простота проведення досліду та відсутність газу-носія, проте потрібна велика кількість аналізованої речовини та необхідна регенерація сорбенту після кожного розділення.

Витіснювальний метод полягає у переносі суміші, що розділяється потоком речовини-витіснювача, яка сорбується краще будь-якого з її компонентів. У ході витіснювального аналізу утворюються окремі, що прилягають один до одного зони компонентів, які розміщуються у порядку збільшення їх сорбуємості.

Найбільшого застосування методи хроматографії знаходять при визначенні якісного та кількісного складів аналізованих сумішей речовин (газів та парів). В залежності від конкретних умов проведення процесу як газ-носії використовують азот, гелій, аргон, водень, повітря та CO_2 . Кожен з цих газів має переваги та недоліки.

Як сорбенти застосовують силікагель, активоване вугілля, окис алюмінію, синтетичні цеоліти та пористі полімери.

Проходячи крізь хроматографічну колонку, суміш, що аналізується, розділяється на складаючі її компоненти, які по черзі (зворотно-пропорційно часу утримання) поступають у детектор разом з газом-носієм. Призначення детектора — виявлення присутності цих компонентів за величиною електричного сигналу, амплітуда та тривалість якого є мірою кількості або концентрації визначаємого компонента у газі-носії. Сьогодні в основному використовують диференційні детектори, їх чутливість, що визначає чутливість приладу може бути дуже високою. Набули поширення такі типи детекторів: теплопровідності, іонізаційні (полум'яно-іонізаційний, радіаційний, фотоіонізаційний, які відрізняються способом іонізації газу), аргонний, електронно-захватний.

Найбільшого поширення отримав детектор теплопровідності (катарометр), оснований на ефекті зміни температури нагрітого тіла — провідника з струмом — при зміні теплопровідності оточуючого його газу. Змінення температури провідника реєструється за температурною залежністю його електричного опору. Головними елементами катарометра є два ідентичних канали, просвердлених у металевому блоці, вздовж яких натягнуті нагріваємі струмом спіралі з платинової проволочки. Через один з цих каналів (порівняльний) пропускають потік чистого газу-носія, через інший (вимірювальний) — газовий потік, що виходить з колонки.

Величина сигналу катарометру визначається співвідношенням теплопровідності визначаємого компонента до теплопровідності газу-носія, а знак сигналу залежить від того, чия теплопровідність більше: визначаємого компоненту або газу-носія. З всіх газів, які застосовують як носії в приладах з катарометрами, найбільшу теплопровідність мають водень та гелій, внаслідок чого сигнал катарометра стає негативним. Якщо

як газ-носії застосовують азот або аргон, то полярність сигналу катарометра стає позитивною.

Недоліки катарометра — його досить велика інерційність і порівняно низька чутливість (не вище $10^{-3}\%$). Катарометр не дозволяє також виявляти речовини, теплопровідність яких порівняна з теплопровідністю газу-носія.

Значно більшу чутливість мають іонізаційні детектори, що поділяються на полум'яно-іонізаційні, радіаційні і фотоіонізаційні, які відрізняються один від одного способом іонізації газу.

Схема полум'яно-іонізаційного детектора наведена на рис. 6.12[3].

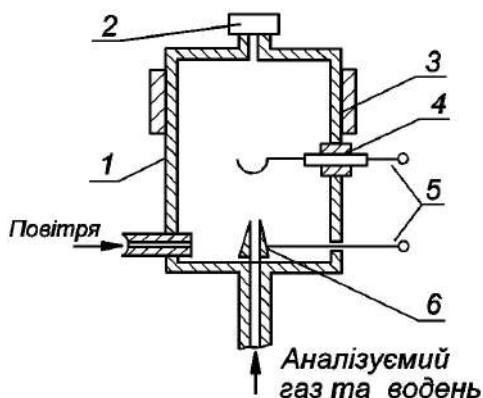


Рис. 6.12. Схема полум'яно-іонізаційного детектора: 1— корпус; 2 — штуцер з фільтром; 3 — нагрівач; 4 — ізолятор; 5 — електроди; 6 — пальник

У корпусі детектора встановлений пальник, що одночасно є одним з електродів, і колекторний електрод, виготовлений із платинового дроту, вони ізольовані від корпусу. Між пальником і колекторним електродом прикладається напруга порядку 100–300 В; при цьому у колектора негативний потенціал. У нижній частині корпусу є патрубок для піддування повітря, а у верхній — нагрівач, що запобігає конденсації водяних парів, які утворюються при горінні. Іонізація молекул визначаемого компонента відбувається у водневому полум'ї, причому водень в одних випадках одночасно є газом-носієм, в інших його спеціально подають у детектор. Провідність самого водневого полум'я мала, і фоновий струм детектора не перевищує 10^{-15} А. Компоненти суміші, потрапляючи в зону полум'я, утворюють іони, електропровідність останнього різко зростає, і в ланцюзі

детектора з'являється струм, величина якого пропорційна концентрації компонента суміші в детекторі.

Полум'яно-іонізаційний детектор — один із найбільш чутливих сучасних детекторів: його гранична чутливість досягає 10^{-14} моль/с. Недолік детектора — вибухонебезпечність водню.

До радіаційних детекторів належать детектори по поперечному перерізу іонізації, аргоновий і гелієвий детектори, електронно-захватний детектор і деякі інші.

Детектор по поперечному перерізу іонізації заснований на тому, що ефективні перетини іонізації молекул виявляемого компоненту і газу-носія різні. Тоді при постійному тиску «заміна» частини молекул газу-носія викликає зміну іонного струму, що фіксується як хроматографічний пік. Цей детектор може вимірювати концентрацію будь-якого газу до 100% — при застосуванні газів-носіїв з малим ефективним перетином іонізації (гелій, водень, азот). Робочий діапазон напруженості поля в такому детекторі складає 30–100 кВ/м; чутливість — 10^{-8} моль/с.

Значно більшу (до 10^{-14} моль/с) чутливість має аргоновий детектор. Тут як газ-носієв використовують аргон, який піддається впливу іонізуючого випромінювання. У результаті іонізації утворюються позитивні іони і вільні електрони. Під дією зовнішнього поля виникає струм цих електронів — фоновий струм детектора. Крім того, деяка частина молекул аргону збуджується випромінюванням і утворюються метастабільні, але неіонізовані атоми. Ці атоми швидко повертаються у вихідний стан, випускаючи ультрафіолетове випромінювання. В аргоновому детекторі використовується поле високої напруженості, при якому процес утворення метастабільних атомів аргону йде інтенсивніше процесу іонізації.

Енергія, випромінювана метастабільними атомами аргону, достатня для іонізації молекул компонентів аналізованої проби, що надходять у детектор. Додаткові іони, що утворюються, викликають збільшення струму стільнику, що і є сигналом детектора. Найкращим рішенням аргонового детектора є три-електродний мікродетектор (рис. 6.13). У цьому детекторі іонний струм вимірюють за допомогою електрометричного підсилювача. Фоновий струм складає 10^{-8} – 10^{-9} А при напрузі на електродах 800–2 000 В; лінійний динамічний діапазон дорівнює 10^5 . Поріг чутливості детектора складає $2 \cdot 10^{-14}$ г/с при рівні шумів 10^{-13} . Потенціал збудження аргону дорівнює 11,7 еВ, і у камері з аргonom іонізуються лише молекули деяких газів (з меншими потенціалами іонізації). Цей недолік можна подолати, якщо замість аргону використовувати гелій, у якого потенціал

метастабільного стану дорівнює 19,8 еВ. Слід зазначити, що для досягнення високої чутливості цих детекторів необхідні аргон і гелій дуже високої чистоти. Конструкція такого гелієвого детектора аналогічна наведеним на рис. 6.13, а[3]

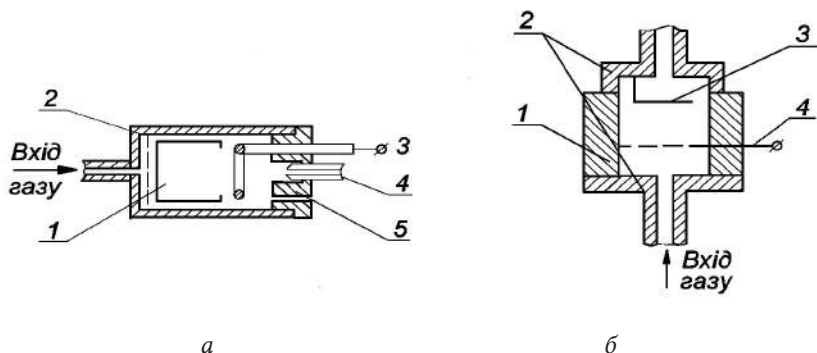


Рис. 6.13, а) Триелектродний аргонний мікродетектор: 1 — джерело радіоактивного випромінювання; 2 — корпус (катод); 3 — сітка; 4 — анод; 5 — кришка з фторопласту; б) Електронно-захватний мікродетектор: 1— корпус з фторопласту; 2— кришка з бронзи; 3 — катод з фольги; 4—анод.

Електронно-захватний детектор (рис. 6.13, б) являє собою іонізаційну камеру з паралельними електродами, що містить джерело радіоактивного випромінювання. Цей детектор особливо чутливий до з'єднань, що володіють високою електронною спорідненістю (наприклад, таких, що містять галоген). Робота електронно-захватного детектора полягає в зменшенні величини іонізаційного струму детектора при влученні в нього з'єднань з високою електронною спорідненістю. Особливо доцільно використовувати цей детектор при визначенні органічних, зокрема металоорганічних, з'єднань, а також у всіх випадках, коли аналізуються суміші речовин біологічного походження.

Останнім часом газова хроматографія як детектуючі пристрої застосовує мас-спектрометри і спектрофотометри інфрачервоного й ультрафіолетового випромінювань.

Прикладом цього може служити хромато-мас-спектрометрія. Запис хроматограм і мас-спектра відбувається, як правило, одночасно. Інформація, що дається хроматомас-спектрограмою значно більше тієї, яку одержують при роздільному використанні хроматографії і мас-спектрометрії. У табл. 6.6 наведені приклади деяких сучасних хроматографів[35].

Таблиця 6.6. — Деякі сучасні газові хроматографи

Назва та тип	Фірма — виготовлювач, країна, тип	Принцип дії та метрологічні характеристики	Значення метрологічних характеристик
Хроматограф газовий марки GC 95 для ви- значення складу проб речовин та матеріалів при аналітичному контролі об'єктів навколишнього середовища	Фірма «Biolyt», Австрія, GC 95	Термокондуктометричний детектор: Полум'яно- іонізаційний детектор: електронно-захватний детектор: термоіонний детектор: полум'яно — фотометричний детектор:	$2 \cdot 10^{-6}$ г/см ³ (по нонану) $1 \cdot 10^{-12}$ г/с (по додекану) $1 \cdot 10^{-14}$ г/с (по ліндану) $2 \cdot 10^{-9}$ г/с (по азоту) $1 \cdot 10^{-12}$ г/с (по фосфору) $1 \cdot 10^{-12}$ г/с (по сірці)
Хроматографи газові промислові для ана- літичного контролю об'єктів навколишньо- го середовища відпо- відно до МВИ США	Фірма «Perkin Elmer Corporation», США, PHOTOVAC, мод. 10SPlus, ARIES, Voyadger	Межі детектування (фотоіоні- заційний детектор по бензолу)	$1,18 \cdot 10^{-11}$ г
Хроматографи газові з детекторами: пол- ум'яно-іонізаційним (ДПІ), за теплопровід- ністю(ДТП), електро- нно-захватним (ДЕЗ), термоіонним (ДТІ) для масових аналізів органічних та неорга- нічних газоподібних та рідких з'єднань при екологічному контролі	ТОО «Хроматограф», Москва, Росія	Межі детектування: пропан (ДТП) пропан (ДТІ) ліндан (ДЕЗ) метафос (ДТІ)	$5 \cdot 10^{-9}$ г/с $1 \cdot 10^{-11}$ г/с $3 \cdot 10^{-13}$ г/с $2 \cdot 10^{-12}$ г/с

Мас-спектрометри

Мас-спектрометри (додаток 6) призначені для якісного та кількісного аналізу газу. Аналіз, що проводять за їх допомогою являє собою послідовність таких операцій: а) забір проби газу, що досліджують; б) перетворення проби речовини, що аналізують в іони та формування іонного пучка в електричному полі джерела іонів; в) розділення іонного пучка за масами в магнітному та електричному полях; г) реєстрація іонних струмів у приймачах іонів та посилення іонних струмів.

Три останні операції мас-спектрометричного аналізу проводяться в умовах високого вакууму, при якому довжина вільного

пробігу іонів та молекул газу значно більша лінійних розмірів джерела іонів та мас-аналізатора.

За способом розділення іонів у мас-аналізаторах поділяють мас-спектрометри на статичні та динамічні. У статичних використовуються постійні або змінні електричне або магнітне поля, які змінюються повільно, а у динамічному — розділення іонів за їх масами відбувається за часом їх прольоту через простір, позбавлений електричних та магнітних полів, або через простір з високочастотними полями.

Принцип дії цих приладів розглянемо на прикладі мас-спектрометричного газоаналізатора, який розділяє іони в магнітному полі (рис. 6.14)[3]. Іони, попередньо прискорені в електричному полі джерела іонів, виходять з нього через щілину a у вигляді сформованого іонного пучка з кутом розходження 2α . Потрапивши у магнітне поле секторної форми, яке направлено перпендикулярно площині малюнка, іони відхиляються від початкового напрямку та рухаються по круговим траєкторіям, радіуси яких відмінні для іонів, що володіють різними відношеннями m/l . В результаті іони, що мають одні маси, уловлюються приймачем δ , інші — приймачем ϵ , треті — приймачем z . Потрапивши у приймач, вони накопичуються на його колекторі, а потім їх заряд реєструється вимірювальною схемою.

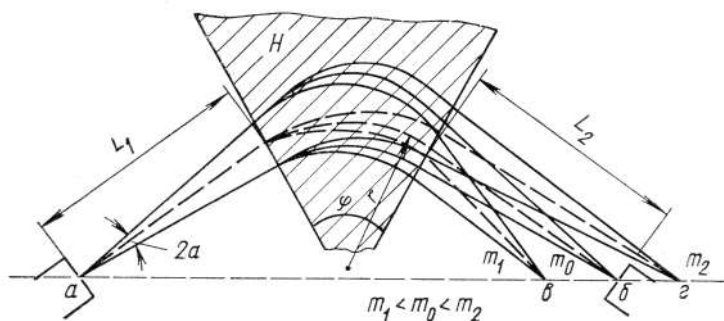


Рис. 6.14. Схема розділення іонів за вагою у поперечному секторному магнітному полі

Контрольні запитання.

1. Укажіть основні вимоги при заборі проб повітря.
2. Назвіть основні типи газоаналізаторів.
3. Укажіть область використання та принцип дії газоаналізаторів теплопровідності.

4. Поясніть фізичне явище, яке лежить в основі принципу дії магнітних газоаналізаторів.
5. Вказати принцип дії електрохімічних газоаналізаторів, навести їх основні типи.
6. Навести основні типи оптичних газоаналізаторів.
7. Використовуючи яку фізичну властивість речовини працюють газоаналізatori ІЧ — та УФ — поглинання?
8. Яке явище лежить в основі хроматографічного процесу визначення хімічного складу газової суміші?
9. Які основні методи (варіанти) газохроматографічного процесу ви знаєте?
10. У чому полягає принцип дії мас — спектрометрів?

ТЕМА 3.

МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ ВИРОБНИЧОГО ПИЛУ У ПОВІТРІ

Лекція 7.

Методи та прилади для визначення концентрації виробничого пилу у повітрі

ПЛАН

- 7.1. *Загальна характеристика методів вимірювання пилу в оточуючому середовищі.*
- 7.2. *Характеристики методів, заснованих на попереднім осадженні пилу (з виділенням дисперсної фази).*
- 7.3. *Характеристики методів, що дозволяють визначити концентрацію пилу без попереднього його осадження (без виділення дисперсної фази).*

7.1. Загальна характеристика методів вимірювання пилу в оточуючому середовищі

Значну частину промислових викидів, що забруднюють повітряний басейн, складає пил.

Пилом називають дисперсну систему, що складається з найдрібніших твердих часток, що знаходяться у газовому середовищі у зваженому стані. Пил звичайно класифікують на промисловий та атмосферний. Вміст пилу в атмосфері визначається як розмірами викидів промислових підприємств, так і інтенсивністю його надходження від природних джерел.

Пил робить шкідливу дію на організм людини; найбільш небезпечний субмікронний пил (менше 2 мкм). Пил може бути причиною легеневих і шкірних захворювань. Тому санітарним законодавством у нашій країні регламентуються гранично допустимі концентрації пилу в повітрі.

Сьогодні відомо вже понад 30 польових та лабораторних методів вимірювання пилу, точніше аерозолів. Таке різноманіття методів пояснюється складністю визначення концентрації аерозолів, оскільки останні відрізняються один від одного хімічним і дисперсним складом, фізичними властивостями і ступенем електризації. Але жоден з методів не задовольняє комплексу вимог, пропонованих до них, насамперед тому, що у процесі вимірювань ще поки не можна уникнути тих чи інших порушень у стані аерозольної хмари. Однак практика контролю властивостей

навколишнього середовища дозволяє виділити найбільш надійні і достовірні методи.

Методи виміру концентрації пилу поділяють на дві групи:

- 1) методи, засновані на попереднім осадженні (з виділенням дисперсної фази);
- 2) методи без попереднього осадження пилу (без виділення дисперсної фази).

Більшість методів виміру дисперсного складу і концентрації передбачає дві операції: попереднє виділення з повітря часток, що складають дисперсну фазу аерозолі, і наступне дослідження цих часток.

Залежно від фізичних принципів, застосовуваних для визначення концентрації пилових часток, розглянуті методи вимірів поділяються на **вагові** (масові); **електрофізичні**, пов'язані з визначенням зарядів аерозольних часток; оптичні і фотоелектричні, радіоізотопні; п'єзоелектричні та інші.

У наведену класифікацію методів визначення дисперсного складу слід ввести доповнення, що підрозділяє прилади-аналізatori на три групи, які дозволяють одержувати інтегральну криву розподілу за розмірами; диференціальну криву розподілу і вимірювати параметри розподілу (σ , r_0 , r_{32} та інші).

7.2. Характеристики методів, заснованих на попереднім осадженні пилу (з виділенням дисперсної фази)

Ваговий метод

За діючими в Україні санітарними нормами вміст пилу в навколишньому середовищі рекомендується оцінювати у ваговому виразі [35].

Ваговий метод виміру концентрації пилу полягає у виділенні з пилогазового потоку часток пилу і визначенні їхньої маси шляхом зважування. Він заснований на фільтрації запиленого повітря через фільтр або на седиментаційному, термо-преципітаційному, інерційному електростатичному осадженні пилу з наступним визначенням його уловленої маси. Маючи дані про кількість повітря, що пройшло через фільтр, можна розрахувати вміст пилу в 1 м^3 повітря.

При цьому оптимальна швидкість відбору, що виміряна за допомогою ротаметрів, повинна складати 10–15 л/хв. Більш високу точність (у порівнянні з ротаметрами) дають капілярні витратоміри. Ваговий метод добре виправдав себе в практиці контролю навколишнього середовища для розрахунку вмісту пилу в 1 м^3 повітря. Широко застосовується давно розроблена методика

визначення запиленості повітря з використанням аналітичних аерозольних фільтрів із тканини (фільтрів АФА), що мають високу ефективність фільтрації і малий аеродинамічний опір. Ці фільтри цілком затримують частки розміром 0,1–0,2 мкм при об'ємній швидкості протягування повітря до 6 м³/г. Як фільтруючий матеріал для АФА застосовують тканини ФПП-15, ФПМ-15 та ін. Цей матеріал являє собою рівномірний шар ультра тонких волокон з полімерів на марлевій підкладці чи без неї. Завдяки їх гідрофобності фільтри можна зважувати без сушіння. Ці фільтри не розчиняються у більшій частині органічних розчинників. Тканини ФПМ-15 стійкі до дії кислот і лугів.

Фільтри АФА складаються з окремого чи нанесених на опорне кільце фільтруючого елемента і захисних паперових полів з виступами. За допомогою фільтрів АФА проводиться масовий, радіографічний, радіо-спектрометричний, радіометричний і радіохімічний аналізи аерозолів.

Методика визначення масової концентрації пилу за допомогою фільтрів АФА[3] передбачає такі етапи: попередню підготовку і зважування фільтра, добір проби, визначення приросту ваги фільтра після добору проби, обчислення концентрації пилу.

Точність визначення масової концентрації пилу залежить насамперед від точності зважування і визначення об'єму повітря, прокачаного через фільтр. Для підвищення точності цих вимірів відбір проби ведуть одночасно на три фільтри, після чого визначають середнє значення похибки, яке звичайно складає близько 10%.

Переваги вагового методу: значна об'ємна показність проби завдяки великому об'єму повітря, що відбирається; можливість одержання проби з кількістю пилу, достатнім для одночасного проведення різних досліджень (хімічного, рентгенографічного, дисперсного складу та ін.); простота вимірів.

Недоліки методу: тривалість відбору проб та імовірність одержання завищених середніх значень концентрації дисперсної фази у результаті випадкових короточасних викидів пилу під час відбору проби.

Фотоелектроколориметричний метод

Фотометричний метод виміру концентрації пилу в повітрі заснований на попереднім осадженні часток пилу на фільтрі і визначенні оптичної щільності пилового осаду.

Фотоелектроколориметричні вимірювачі концентрації дисперсної фази засновані на вимірюванні інтенсивності фарбування запиленого фільтра (після прокачування через нього аерозолі, що досліджують) методом

порівняння з еталоном білизни за допомогою фоторезисторів, включених за схемою врівноваженого моста.

При визначенні вагової (масової) концентрації дисперсної фази для кожного виду аерозолію необхідне комплексне калібрування приладу.

Іонізаційний метод

Серед приладів, заснованих на іонізаційному методі вимірювань, відомі прилади, що використовують властивість речовин поглинати — α або β — випромінювання пропорційне своїй масі, що приходить на одиницю площі, перпендикулярній напрямку променів.

Робота приладу заснована на методі концентрування дисперсної фази аерозолію прокачуванням визначеного об'єму повітря через фільтруючу стрічку і наступного виміру товщини пилового осаду на ній за поглинанням α — часток, що випускаються наявним у приладі джерелом. Загальна товщина поглинача (фільтр і осад пилу) збільшилася, тому число α — часток, що досягли детектора, буде менше, ніж у випадку чистого фільтра, що викликає відхилення стрілки приладу, і показує на величину, пропорційну товщині пилового осаду.

Рахунковий метод

Рахунковий метод заснований на осадженні аерозольних часток на екрані (покривному склі) і на подальшому дослідженні осаду під мікроскопом. Тут найбільш поширені лічильники ударної дії (коніметри). Загальним принципом усіх коніметрів є осадження часток пилу на покривному склі (найчастіше на склі, обробленому вазеліном), поміщеному перпендикулярно до струменя, що пропускається з великою швидкістю через плоску щілину або круглий отвір. Завдяки інерції частки пилу виходять з лінії струму й осаджуються на склі.

Коніметрам різних конструкцій у більшому чи меншому ступені притаманні такі недоліки:

- а) невисока ефективність уловлювання дрібних фракцій пилу;
- б) одержання неоднорідних зразків проб;
- в) роздроблення часток твердих і крихких речовин, а також агрегування часток при проходженні з великою швидкістю (80–100 м/с) через сопло;
- г) вибіркковість до дисперсного складу пилу при заборі проби повітря та ін. Головним недоліком є невідтворюваність показань, що видаються не тільки коніметрами різних типів, але й окремими приладами того самого типу.

Усі прилади, що оцінюють запиленість повітря в рахункових показниках (коніметри, іміджери, термопреципитатори й ін.), служать лише для одержання якісних препаратів, що потім досліджують під мікроскопом.

Люмінесцентний метод

До методів, заснованим на попереднім осадженні часток пилу, відноситься також люмінесцентний метод. Для визначення концентрації пилу в атмосферному повітрі використовують осадження її на фільтрі, обробленому флуоресціюючими розчинами, і наступне вимірювання інтенсивності флуоресценції. При цьому вимірюють інтенсивність флуоресценції фільтра до і після осадження на ньому пилового осаду. Велика концентрація пилу викликає гасіння флуоресценції, причому спостерігається лінійна залежність між гасінням флуоресценції і поверхневою концентрацією пилу. Перевагами люмінесцентного методу є висока чутливість і широкий інтервал вимірюваних концентрацій.

7.3. Характеристики методів, що дозволяють визначити концентрацію пилу без попереднього його осадження (без виділення дисперсної фази)

Методи і прилади без виділення дисперсної фази аерозолі дають безпосередньо інформацію про концентрацію і фракційний склад дисперсної фази аерозолі. Концентрацію дисперсної фази у вагових показниках визначають непрямым способом. Безупинна реєстрація дисперсної фази аерозолів приладами, заснованими на методах дослідження без виділення останньої, розширює можливості з розв'язання різних задач в області знепилювання повітря. Це оптичні, іонізаційні, електричні, радіометричні й інші методи.

Оптичні методи

Робота тиндалоскопів заснована на використанні ефекту розсіювання світла зваженими у повітрі частками. Розроблено кілька приладів, принцип дії яких полягає у вимірюванні за допомогою чутливого фотоелемента і гальванометра ослаблення світла під впливом абсорбції і розсіювання світла при проходженні світлового потоку через запилене повітря. Фотоелектричний метод дозволяє визначати запиленість повітря, що складає 1 мг/м^3 і менше.

Основні труднощі, пов'язані з застосуванням фотометрії при вивченні пилового фактора, викликані особливістю оптичних властивостей аерозолів, що полягають у мінливості їх дисперсності і складу речовини.

Інтенсивність розсіювання світла залежить не тільки від площі поверхні часток і довжини світлової хвилі, але і від виду пилу, її дисперсного складу, форми і поверхневих властивостей аерозольних часток.

Електричні методи

В електронних коніметрах використовується здатність пилових часток електризуватися при високій швидкості руху в потоках. Досліджуваний аерозоль просмоктується з великою швидкістю через канал. Пилінки, що одержали при проходженні каналу електричний заряд, віддають його екрану (зонду), який зустрічає на своєму шляху потік при витіканні з каналу. Сила струму в ланцюзі зонда у цьому випадку буде пропорційна площі поверхні часток.

Принцип попередньої зарядки пилу і наступного визначення величини цього заряду покладений в основу деяких приладів для безупинного визначення запиленості. У цьому випадку використовується певний зв'язок між величиною поверхні пилу в одиниці об'єму газу і отриманим ним зарядом.

Електроіндукційні пиломіри відрізняються високою чутливістю, швидкістю, зручністю в експлуатації, однак їхні показання прямо пропорційні поверхневій концентрації пилу. Виміри масової концентрації за допомогою таких приладів утруднені через істотну похибку виміру при відхиленні параметрів розподілу реального аерозолу від каліброваного. Щоб усунути зазначену похибку і тим підвищити точність вимірювання вагової концентрації дисперсної фази аерозолу, використовують спосіб вимірювання об'ємної концентрації дисперсної фази аерозолу.

Інші перспективні методи визначення концентрації пилу.

Сьогодні є прилади, засновані на принципах голографії з використанням лазерного випромінювання. Застосування лазерної техніки і методів одержання голограм дозволяє зайняти цим приладам ведуче місце серед усіх інших вимірювачів концентрації дисперсної фази аерозолів, бо поки це єдиний метод, що дозволяє оцінювати вміст і розподіл часток аерозолу без порушення природного стану середовища.

При розгляді методів виміру концентрації часток у повітрі варто особливо виділити прилади, що використовують залежність частоти власних коливань п'єзокварцової пластинки від маси осадженої на ній пилу. Для пластинок кварцу, що мають малу масу і високу частоту власного резонансу, можлива зміна частоти до 200 Гц при зміні маси пластинки на 10^{-6} г.

Становлять інтерес також методи, засновані на використанні резонансних властивостей натягнутої струни. Зміна маси струни приводить до зміни власної частоти коливань.

Розходження між струнними і п'єзоелектричними випромінювачами концентрації полягає у тому, що перші менш чутливі, складніші за конструкцією датчика і висувають більш жорсткі вимоги до температури навколишнього середовища. На сьогодні ведуться роботи з усунення цих недоліків, однак приладів, що успішно реалізують описаний принцип, ще не створено.

Методи вимірювання дисперсного складу аерозолів

Найбільший інтерес представляють методи визначення дисперсного складу аерозолів, що використовують електричні властивості аерозольних часток. Прилади, що реалізують ці методи, найчастіше називають електропреципитаторами. Навіски заряджених аерозольних часток, що осіли під впливом електричного поля на колекторному електроді приладу, досліджують під мікроскопом для визначення кількості часток у кожній заздалегідь обраній фракції. Основними технічними труднощами при приладовій реалізації цих методів є вимога осадження часток однорідними за розмірами групами з чітко вираженими межами. У електропреципитаторах ця вимога забезпечується тим, що зарядка й осадження часток проводяться у двох розділних зонах; із заряджених часток формується тонкий струмінь аерозолу, який оточений оболонкою знепиленого повітря; забезпечується ламінарність потоку аерозолу; осаджуюче електростатичне поле за довжиною осаджуючого конденсатора нерівномірно, причому напруженість його зростає зі збільшенням координат осадження.

Недолік таких приладів полягає у необхідності досліджувати осад під мікроскопом, тому що труднощі, пов'язані з обробкою результатів, не дозволяють автоматизувати процес вимірювання.

Удосконалювання методу електропреципитації йде у напрямку застосування непрямих способів оцінки кількості часток, що осіли на визначену ділянку колектора, наприклад за величиною електричного заряду часток, що осіли на відповідних ділянках колектора.

Крім електропреципитаторів, існують і інші прилади, що використовують електричні властивості аерозольних часток для дослідження їхнього розподілу за розмірами. Деякі сучасні прилади для вимірювання концентрації пилу наведені у додатку 7[36].

Контрольні запитання.

1. Що таке пил, на які групи його поділяють?
2. На які групи поділяють методи вимірювань концентрації пилу?
3. Які ви знаєте групи методів вимірювань концентрації пилу залежно від фізичних принципів, застосовуваних для визначення концентрації пилових часток?
4. Які методи, засновані на попереднім осадженні пилу (з виділенням дисперсної фази) ви знаєте? Укажіть їх переваги та недоліки.
5. Охарактеризуйте ваговий метод визначення концентрації пилу, які ви можете навести його переваги та недоліки?
6. Які методи, що дозволяють визначити концентрацію пилу без попереднього його осадження (без виділення дисперсної фази) ви знаєте? Вкажіть їх переваги та недоліки.

ТЕМА 4. МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ПОВІТРЯ.

Лекція 8. Методи та прилади для визначення швидкості руху повітря.

ПЛАН

- 8.1. *Загальна характеристика методів та приладів вимірювання швидкості руху повітря.*
- 8.2. *Типи анеометрів.*

8.1. Загальна характеристика методів та приладів вимірювання швидкості руху повітря.

Швидкість руху повітря у виробничих приміщеннях та на відкритому повітрі вимірюють кататермометрами, анеометрами різноманітних конструкцій та іншими приладами[37, 38].

Кататермометр (називається також тепловим анеометром) являє собою спиртовий термометр з циліндричним або кульовим резервуаром у нижній частині, що переходить у капіляр з розширенням у його верхній частині. Він призначений для вимірювання малих швидкостей руху повітря (0,1–0,5 м/с). Принцип дії приладу ґрунтується на оцінці охолоджувальної здатності руху повітря у деякому інтервалі температур. Шкала кататермометра проградуєвана від 35 до 38 °С (у приладі з циліндричним резервуаром) і від 33 до 40 °С (у приладі з кульовим резервуаром); середня точка шкали — 36,5 °С. Перед вимірюванням прилад нагрівають у воді з температурою 65–75 °С. Потім виймають із води, насухо витирають і вміщують на робоче місце.

Анеометр — це прилад, назва якого походить від двох грецьких слів *άνεμος*(вітер) та *μετρέω*(вимірювати) був винайденим ще в 1540 р. італійським математиком Леона Баттіста Альберті для вимірювання швидкості руху повітря. Зараз його використовують також і для вимірювання потоків та напрямку руху повітря, газів та рідин, причому це стосується як обмежених потоків, наприклад руху повітря у повітропроводах, так і необмежених потоків, наприклад атмосферного вітру. Анеометри мають в основному метеорологічне призначення, адже зміни таких параметрів як швидкість та напрям вітру вказують на зміни погодних умов, попереджають про наближення

грози, шторму, інших небезпечних природних явищ, що є дуже важливим для пілотів, моряків, інженерів, та і для всіх нас. Як правило, це легкі портативні прилади, зручні у користуванні навіть у складних польових умовах. Принцип роботи анемометра полягає у виявленні зміни деякої фізичної властивості потоку, або у дії потоку на механічний пристрій, розміщений у потоці. При цьому анемометр може вимірювати повну величину швидкості, величину швидкості у площині та компоненту швидкості в певному напрямку. Крім того, сучасні анемометри залежно від моделі можуть вимірювати напрям вітру, об'ємну витрату повітря, вологість, температуру, тиск. Таким чином, анемометри перетворюються на портативні метеостанції.

8.2. Типи анемометрів

Залежно від способу вимірювання та типу приймального пристрою анемометри поділяють на ряд типів:

- **Обертальні** (крильчасті, чашкові).
- **Теплові.**
- **Вихрові.**
- **Динамометричні** (з трубками Піто).
- **Ультразвукові** (акустичні).
- **Оптичні** (лазерні Допплерівські).

Найбільш поширеними є обертальні анемометри, що відрізняються типом приймаючого пристрою (чашка чи крильчатка).

Обертальні анемометри

У чашкових анемометрах чутливим елементом є хрестовина з чотирма металевими чашками напівсферичної форми, що закріплені на осі. Якщо цей пристрій потрапляє у потік, то тиск повітря на внутрішню поверхню чашки перевищує тиск на її зовнішню поверхню, внаслідок чого виникає обертання лопаті. Вісь лопаті приєднана до вимірювального механізму, який підраховує кількість обертів за певний проміжок часу. Таким чином, чашкові анемометри проводять вимірювання швидкості потоку в площині, перпендикулярній до осі обертання чашок, миттєву, або усереднену в деякому проміжку часу. Чашкові анемометри в основному використовуються у метеорології для вимірювань на відкритих ділянках, оскільки характеризуються певною стійкістю до турбулентних потоків. Діапазон вимірювання чашкових анемометрів складає від 1 до 50 м/с. На рис. 8.1 наведено будову анемометра ручного чашкового з рахунковим механізмом типу МС-13[38, 39]. Його застосовують

для вимірювання середньої швидкості вітру в межах від 1 до 20 м/с. Чутливим елементом цього приладу є вертушка з чотирма полусферичними чашками 1. Вона закріплена на осі 3, обидва кінці якої упираються в агатові підшипники. Верхній підшипник осі 3 знаходиться у гвинті, який закручений у гніздо зверху захисних дужок 2, нижній підшипник знаходиться всередині корпусу 4. На нижньому кінці осі є черв'як 5, пов'язуючий вісь 3 з входним черв'ячним колесом механічного лічильника обертів. Редуктор рахівника складається із зубчатих колес та пов'язаний з трьома стрілками, які при обертанні вертушки переміщуються по трьох шкалах. Центральна шкала має 100 поділок з ціною поділки три оберти (один оберт центральної великої стрілки відповідає 300 обертам вертушки). Малі шкали мають по 10 поділок. Збоку з корпусу 4 виступає важіль 7 аретира лічильника, поворотом якого по часовій стрілці лічильник вмикається, а проти часової — вимикається.

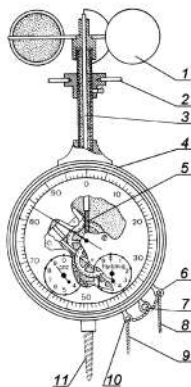


Рис. 8.1. Анемометр ручний чашковий з лічильниковим механізмом (МС-13): 1 — чашка; 2 — захисна дужка; 3 — вісь; 4 — корпус; 5 — черв'як; 6, 10 — кільця; 7 — важіль з кільцем; 8, 9 — шнури; 11 — гвинт.

Крильчасті анемометри (рис. 8.2). Їх використовують для вимірювання швидкостей потоків у трубах у випадках, коли маємо справу з постійним напрямком руху потоку. Основною відмінністю цих приладів від чашкових є використання як чутливий елемент крильчатки. Крильчатка прикріплена до трубчастої осі, що у свою чергу, приєднана до механізму підрахунку обертів за певний проміжок часу. У більш простих моделях крильчатка жорстко приєднана до вимірювального блока, в інших — за допомогою гнучкого з'єднання для вимірювань у важкодоступних місцях. Вони є більш чутливими і здатні вимірювати швидкості від 0,1 до 5 м/с.



Рис. 8.2. Анемометр крильчастий.

Анемометри ручні індукційні (рис. 8.3)[38, 39]. Вони дозволяють вимірювати середню (за 3–6 с) швидкість повітря у межах від 2 до 30 м/с.

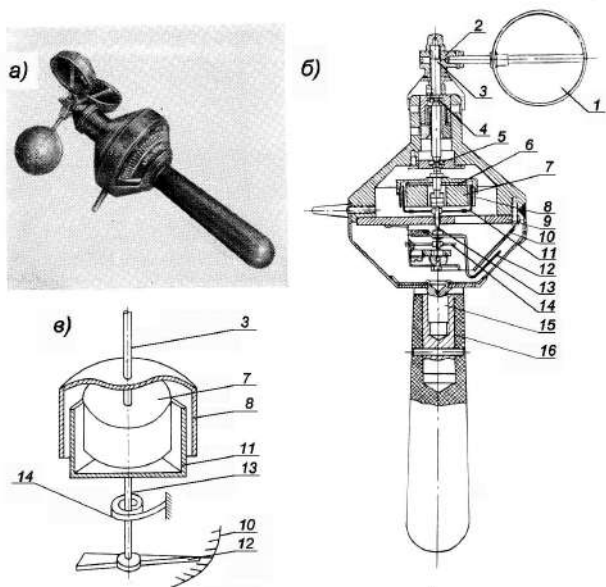


Рис. 8.3. Анемометр ручний індукційний АРІ: а — зовнішній вигляд; б — загальний вид; в — вузол тахометра; 1 — трьох чашкова вертушка; 2 — втулка; 3, 13 — осі; 4, 5 — підшипники; 6 — термокомпенсатор; 7 — постійний магніт; 8 — магнітопровід; 9 — плата; 10 — шкала швидкості; 11 — стаканчик; 12 — стрілки; 14 — пружина; 15 — хвостик; 16 — ручка.

Первинним перетворювачем в них слугує тричашкова вертушка, посажена на спільну з магнітним тахометром вісь. Взаємодія електромагнітного поля (індукційного струму) та магнітного поля постійного магніту

створює приложений до стаканчику момент $M_l = r_l n$, де n — швидкість обертання магніту (об/с), r_l — коефіцієнт пропорційності, що залежить від конструктивних особливостей тахометра (лінійних розмірів магніту, зазору, форми, розмірів та числа полюсів магніту, ступені його намагніченості та нш.) для даного тахометра r_l є постійною величиною.

Теплові (термоанемометри) та ультразвукові (акустичні) анемометри.

Тепловий анемометр

Менш поширеними, проте дуже точними є теплові анемометри. В основному, вони використовуються для вимірювання швидкостей повільних потоків, характеризуються низькою інерційністю, проте потребують постійного калібрування. Принцип роботи теплового анемометра полягає у вимірюванні температури пластини чи нитки розжарювання, яка обдувається вітром. Залежно від швидкості вітру необхідна різна енергія для того, щоб підтримувати температуру сталою. Тобто за температурою пластини можна визначити швидкість вітру. Широко відомі термоанемометри данської фірми DISA Electronic A/S, італійської DELTA OHM та американської(США) Weather Measure Corporation. Так, термоанемометр HD 2303.0 (рис. 8.4) [40] зазначеної вище італійської фірми призначений для вимірювання швидкості повітряного потоку, витрати і температури повітря всередині трубопроводів та вентиляційних отворів та шахт.



Рис. 8.4. Термоанемометр HD 2303.0.

Цілий ряд крильчаток різного діаметру, які сумісні з вимірювальним блоком, забезпечують прецизійний результат у різних умовах та для

різних середовищ. Температура вимірюється зондами занурення, проникнення або контакту, експлуатують термоанемометр від -5 до $+50$ °C, корпус має ступінь захисту від вологи та пилу IP 67[40].

Ультразвуковий анемометр

Принцип роботи ультразвукового анемометра ґрунтується на тому, що звук (ультразвук) поширюється швидше у напрямку дії вітру. Як правило прилад вимірює три компоненти вітрового вектору у тривимірному просторі[41]. Вздовж кожної осі розташовано дві пари передавач — приймач. Передавач посилює безперервні або імпульсні ультразвукові хвилі. Залежно від напрямків поширення вітру з ультразвуковою хвилею час проходження останньою відстані d між передавачем та приймачем визначається за формулами:

$$t_1 = d / (V_{y3} + V_i), \quad (8.1)$$

$$t_2 = d / (V_{y3} - V_i), \quad (8.2)$$

де V_{y3} — швидкість поширення ультразвукової хвилі, V_i — швидкість поширення проекції вектора вітру на вісь i . Різниця в часі проходження відстані d між передавачем та приймачем двома ультразвуковими хвилями становить:

$$\Delta t = 2dV_i / (V_{y32} - V_{i2}). \quad (8.3)$$

Ультразвукові анемометри вимірюють величину швидкості вітру у межах 0-75 м/с. Їх недоліком є залежність швидкості поширення ультразвуку від температури, вологості, атмосферного тиску, проте вони можуть вимірювати і напрямок руху повітря та температуру. Розрізняють двовимірні та тривимірні ультразвукові анемометри. Двовимірний анемометр може вимірювати швидкість і напрямок тільки горизонтальних потоків повітря. Тривимірний анемометр здатний проводити вимірювання трьох компонентів напрямку руху потоку. Акустичні анемометри випускають цілий ряд фірм, серед яких вже відмічена раніш американська (США) Weather Measure Corporation та японська Kaijo Denki Co.

Прилади цієї групи відрізняються високою чутливістю (до 1 см/с), малою статичною похибкою (до 1%), високими показниками динамічних характеристик (інерційність не більше 0,01с). Необхідність виготовлення таких приладів викликана тим, що група оперативних приладів, які вимірюють швидкість руху повітря, має велику інерційність та, незважаючи на простоту конструкції та надійність роботи, непридатна для дослідження

мікроструктур вітру, включаючи турбулентні пульсації швидкості вітру, перенесення слабких повітряних струменів, особливо важливих для контролю ступені забруднення довкілля.

Динамометричні анемометри

Вимірювання швидкості потоку повітря можна проводити також шляхом визначення тиску повітря всередині скляної Г-подібної трубки, закритої з одного кінця. Вона називається трубкою Піто, за ім'ям її винахідника. Швидкість руху повітря обчислюється шляхом порівняння надлишкового тиску повітря всередині трубки та зовні. Застосовується для визначення відносної швидкості і об'ємної витрати в газоходах і вентиляційних системах.

Лазерні доплерівські анемометри

Цей тип анемометрів працює за принципом залежності частоти світла, відбитого чи розсіяного рухомим об'єктом (ефект Доплера), від швидкості цього об'єкта.

Ефект Доплера полягає в тому, що при відносному переміщенні джерела та приймача електромагнітних коливань частота коливань, прийнятих приймачем v_1 , відрізняється від частоти джерела v_0 . У цьому випадку[42]

$$v_1 = v_0(1 \pm w/a(\cos \beta)), \quad (8.4)$$

де w — швидкість відносного руху; a — швидкість світла; β — кут між направленням руху джерела та лінією, що з'єднує приймач та джерело.

Знак «плюс» відповідає наближенню джерела, а «-» віддаленню. Ефект Доплера має місце також при розсіянні направлено випромінювання джерела на частках середовища, що рухається.

За природою використовуваного випромінювання (радіохвилі, світло або звук) доплерівські випромінювачі бувають трьох видів: радіолокаційні (доплерівські радары); лазерні або оптичні (доплерівські лідари); акустичні або звукові (доплерівські сонари). За способом подачі сигналу імпульсні та з безперервним випромінюванням.

Згаданий вище ефект при розсіянні випромінювання приймача середовищем, що рухається, покладено в основу створення лазерних доплерівських анемометрів.

Цей метод дозволяє безконтактне вимірювання швидкості потоку газоподібних, рідких і твердих середовищ, що містять неоднорідності, які розсіюють світло та дозволяє вимірювати повільні направлені рухи

у капілярах та живих клітинах, проводити дистанційні вимірювання турбулентної швидкості потоків газу в надзвукових трубах та швидкості вітру в атмосфері. Величини швидкостей можуть мати значення від мкм/с до км/с. Лазерні анемометри допомагають розрахувати швидкість вітру навколо автомобілів, літаків, потягів і космічних апаратів.

Розглянемо схему одного з варіантів лазерного доплерівського вимірювача швидкості (ЛДВШ) (рис. 8.5)[42].

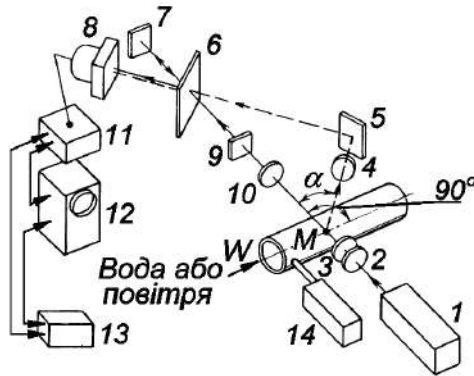


Рис. 8.5. Схема лазерного доплерівського вимірювача швидкості з опорним променем: 1 — лазер; 2 — діафрагма; 3 — фокусуючий об'єктив; 4 — збірний об'єктив для розсіяного випромінювання; 5 — дзеркало; 6 — світлоподільна пластина (напівпрозоре дзеркало); 7 — дзеркало; 8 — фотоелектричний помножувач; 9 — нейтральний фільтр; 10 — збираючий об'єктив для опорного випромінювання; 11 — підсилювач; 12 — аналізатор спектра; 13 — блок живлення; 14 — генератор розсіюючих частот, (опорний промінь, промінь розсіяного випромінювання).

Промінь лазера 1 безупинної дії (його називають прямим, чи опорним) фокусується за допомогою об'єктива 3 у досліджувану точку потоку М. По шляху променя встановлена діафрагма 2, що слугує для обмеження власного випромінювання лазера. Випромінювання лазера, розсіяне під кутом α напрямку прямого променя, збирається об'єктивом 4 і за допомогою дзеркала 5 через напівпрозоре дзеркало 6 направляється на фотоелектричний помножувач (ФЕП) 8. Об'єктив 4 фокусує розсіяне випромінювання на фотокатод ФЕП. Сюди ж за допомогою об'єктива 10 фокусується прямий промінь лазера, що пройшов через досліджуваний потік без розсіювання. По шляху промінь послабляється нейтральним фільтром 9, проходить через напівпрозоре дзеркало 6, відбивається від дзеркала 7 і задньої поверхні

напівпрозорого дзеркала. Дзеркало 7 призначене для усунення різниці оптичних шляхів прямого і розсіяного променів. Рівність довжин оптичних шляхів променів прямого розсіяного світла необхідно для підвищення якості гетеродування на вході ФЕП, що застосовується у більшості схем ЛДВШ для виділення доплерівської частоти взаємодії основного і розсіяного світла. Отриманий у результаті гетеродування сигнал має доплерівську частоту, пропорційну швидкості потоку. З виходу ФЕП сигнал надходить на підсилювач 11 і потім подається на пристрій, що реєструє доплерівську частоту. Таким пристроєм найчастіше є аналізатор спектра 12.

Прилади цього типу виготовляються англійською фірмою Malvern Instruments LTD, американською Thermo Systems Inc, данською DISA Electronic A/S., Російським інститутом оптико-електронних інформаційних технологій та ін. Їх виробляють, в основному, для проведення спеціальних наукових досліджень, оскільки можуть дати суттєво більшу інформацію про параметри вітру у порівнянні з іншими приладами.

Лазерні доплерівські прилади мають такі переваги у порівнянні з пневмометричними та термоанемометричними вимірювачами швидкості.

1. Безпосередньо визначають значення локальних швидкостей потоку.
2. Не вносять збурення до потоку.
3. Мають високе просторове розрішення.
4. Не потребують градування.
5. Мають малу похибку(від частки до одиниць %).
6. Практично не мають інерції.
7. Недоліками цих приладів є їх відносна складність та необхідність введення до потоку як центри розсіювання домішок, нормованих за розміром та кількістю. Проте концентрація їх може бути дуже малою та складати 1 : 30000 або 1 : 50000 частину об'єму газу.

Мультифункціональні анемометри

Окремо слід відмітити мультифункціональні анемометри, які разом з власне анемометром поєднують у собі інші функціональні можливості. Наприклад, гігро- та термоанемометри включають мають датчик вологості, що забезпечує користувача повною метеорологічною інформацією. Серед інших вимірюваних характеристик є освітленість (люксметр), температура (термометр), відносна вологість повітря (гігрометр), шум (шумомір), концентрація CO₂ та ін. Ці прилади характеризуються високою точністю, роздільною здатністю для всіх вимірювальних параметрів, мають додаткові функції розрахунку максимуму / мінімуму, індикацію про низький

заряд та перевищення вимірювального діапазону, як правило, оснащені рідинно- кристалічним екраном. Вимірювання швидкості потоку для зручності може проводитись у різних одиницях (милі/год, км/год, фути/хв, м/с, вузли і т.д.). Більш вартісні моделі мають можливості підключення до комп'ютера з метою обробки результатів, побудови графіків та подальшого аналізу. Можливості розрахунку максимального, мінімального та усередненого значення спрощують статистичний аналіз, автоматичне відключення економить заряд батареї, підсвічування дозволяє працювати при обмеженій освітленості.

Наприклад, анемометри AZ-96792[43] та AZ-8919[44] (рис. 8.6 та 8.7)

(AZ Instrument, Тайвань) прості та зручні у користуванні, забезпечують високоточні результати вимірювань, мають ряд додаткових можливостей для зручності користувача.



Рис. 8.6. Анемометр AZ-96792



Рис. 8.7. Анемометр AZ-8919

Модель AZ-96792 обладнана телескопічним зондом з крильчаткою 18 мм для вимірювань швидкості потоку повітря у важкодоступних місцях, працює у ручному та автоматичному режимі, забезпечує вимірювання та запис таких параметрів: швидкість руху повітря, об'ємна витрата повітря, вологість, температура, точка роси та температура мокрого термометра. Він фактично є портативною метеостанцією. Має можливість підключення до комп'ютера для збору подальшого аналізу отриманих результатів вимірювань.

Анемометр-аналізатор AZ-8919, крім можливостей попередньої моделі, додатково контролює рівень вуглекислого газу в повітрі, для чого обладнаний високоточним недисперсійним інфрачервоним датчиком (NDIR). Зонд крильчатого типу діаметром 10 см та конус для забору повітряного потоку дозволяють вимірювати швидкість потоку в межах від 0,2 до 30 м/с.

Вимірює також об'ємну витрату повітря, вологість, температуру, точку роси, температуру мокрого термометра. Має функції максимального та мінімального значення, необмежену кількість точок для розрахунку середнього значення, підсвічування.

У додатку 8[45–52] наведені порівняльні характеристики анемометрів, які відносяться до основних їх типів, розглянутих цій лекції

Контрольні запитання.

1. Якими приладами можна виміряти швидкість руху повітря?
2. У чому полягає сутність вимірювання швидкості руху повітря кататермометром?
3. Які види анемометрів ви знаєте?
4. Поясніть, які принципи дії покладені в основу конструкцій обертальних анемометрів?
5. Укажіть принцип дії теплового анемометра.
6. Які переваги та недоліки притаманні ультразвуковим анемометрам? У чому полягає їх принцип дії?
7. Які переваги та недоліки притаманні доплерівським анемометрам? У чому полягає їх принцип дії?
8. Які характеристики дозволяють вимірювати мультифункціональні анемометри?

ТЕМА 5. МЕТОДИ ТА ПРИЛАДИ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ

Лекція 9.

Методи та прилади для вимірювання вологості повітря

ПЛАН

- 9.1. Основні визначення та класифікація методів вимірювання вологості повітря.
- 9.2. Методи та прилади для вимірювання вологості.
- 9.3. Метрологія та загальна оцінка гігрометрів.

9.1. Основні визначення та класифікація методів вимірювання вологості повітря

Під **вологістю повітря** (вологовмістом) розуміють вміст водяних парів у повітрі.

Вміст водяної пари у повітрі може оцінюватися багатьма величинами: абсолютною і відносною вологістю, пружністю водяної пари, точкою роси, дефіцитом вологості та ін.

Абсолютна вологість a — кількість водяної пари у грамах, що міститься в одному кубічному метрі повітря (г/м^3).

Пружність водяної пари e , що знаходиться у повітрі, або парціальний тиск водяної пари повітря, виражається у мілібарах (мбар) або в міліметрах ртутного стовпа (мм рт. Ст.). Абсолютна вологість (г/м^3) і пружність водяної пари повітря (у мбар) зв'язані виразом:

$$a = 217 (e / T) \text{ або } a = (0,8 e / (1 + \alpha t)), \quad (9.1)$$

де T та t — температура водяної пари (повітря) у К и °С відповідно, α — температурний коефіцієнт об'ємного розширення пари.

При цій температурі повітря і тиску пружності водяної пари e не може бути більше деякої максимальної кількості водяної пари пружності E — пружності пари, що насичує простір.

Відносна вологість повітря — відношення пружності водяної пари, що міститься у повітрі, до пружності водяної пари, що насичує простір при температурі виражена у відсотках[3].

$$F = (e / E) \cdot 100\% \quad (9.2)$$

Точка роси — температура, при якій водяна пара, що знаходиться у повітрі, досягає стану насичення при незмінному тиску.

Вимірювання вологості навколишнього середовища — ще не сталий напрямок вимірювальної техніки. І хоча вже існують десятки методів визначення вологості повітря і сотні видів приладів, реалізованих на їхній основі, пошук нових методів і приладів продовжується. І це закономірно, бо в одному випадку потрібні прилади для оцінки малих кількостей вологи у повітрі, в інших потрібно фіксувати невеликі зміни вологості або необхідні вимірювання вологості у широких межах температур і т.п.

Початковими вимогами до приладів, що вимірюють вологість середовища, яке оточує людину, є санітарні норми на метеорологічні умови. Вони рекомендують значення оптимальної вологості 40–60% у залежності від температури. Вимірювання з достатньою точністю існуючими конструкціями приладів поки не забезпечені, хоча висуваються дуже жорсткі вимоги. Розгляд методів виміру вологості повітря почнемо з найбільш вдалої, на думку [3] класифікації, яка є запропонованою С.П. Демичевим (рис. 9.1). Вона відрізняється загальним підходом до класифікації приладів контролю середовища, бо заснована на фазовому стані вимірюваної вологи. Це дуже важливо, тому що особливість розглянутого параметра навколишнього середовища складається, як відомо, у тому, що волога може знаходитися у ньому в усіх фазах: газоподібній (водяна пара), рідкій (дощ, роса), твердій (лід). В усіх цих фазах вона впливає на людину як безпосередньо, так і опосередковано — через мікроорганізми, для деяких видів яких водяні краплі є місцем і середовищем мешкання.

Методи вимірювання вологості повітря			
Двофазні		Однофазні	
Сорбційні	Термодинамічні	Побічні	Прямі
Кольорові	Психрометричний	Спектрометричний	Гравіметричний
Оптичний	Компенсаційний	Диелькометричний	Конденсаційний
Ємнісний	Точки роси компенсаційний	Термокондукто — Метричний	Кулонометричний
Кондуктометричний	Точки роси адіабатичний	Іонізаційний	Пневматичний
Ваговий	Термоелектролітичний	Коронного розряду	Дифузійний
Деформаційний	Сорбційно-термічний		Хімічний

Рис. 9.1. Класифікація методів вимірювання вологості повітря

Перехід з однієї фази в іншу — інформативний і використовується при вимірюваннях вологості, він характеризується величиною температури. Температура і вологість — дві тісно пов'язані одна з одною форми активної дії на людину фактором навколишнього середовища. Використання динаміки переходу вологи з однієї фази в іншу і дозволило класифікувати методи вимірювання на однофазні і двофазні. Остання група основана на використанні динаміки переходу з однієї фази в іншу чи рівноваги між газовою і сконденсованою фазами.

Розглянемо у вигляді прикладів найбільш характерні методи вимірювань, які є перспективними для комплексного визначення параметрів повітряного середовища.

9.2. Методи та прилади для вимірювання вологості

Прямі методи належать до класу однофазних. Ці методи дозволяють вимірювати кількість водяної пари або її парціальний тиск безпосередньо в контрольованій пробі, а потім, знаючи об'єм проби і температуру, визначати і відносну вологість.

Найпростіший із прямих методів — ваговий (гравіметричний). Використовують метод для оцінки декількох параметрів середовища, зокрема для визначення наявності у ній будь-яких домішок. Для цього пробу повітря визначеного об'єму пропускають через сорбент. Зміна маси останнього і є мірою вологості повітря.

Джерелами методичних похибок можуть бути:

- а) забір проби повітря з місця, не характерного для оцінки всього об'єму повітря;
- б) наявність у повітрі різних аерозолів, механічних і бактеріальних домішок;
- в) зміна тиску атмосфери;
- г) коливання температури в процесі вимірювання.

Джерелами інструментальних похибок можуть бути неточність у визначенні об'єму проби повітря, а також маси сорбенту до і після вимірювання; а також недооблік коливань тиску і температури. Оцінюючи точність вагового методу, варто визнати його одним із достовірних. Не випадково на основі цього методу створюють еталони з погрішністю не більше 0,1%.

Істотним і основним недоліком методу є громіздкість апаратури, тривалість вимірювань, трудомісткість і складність автоматизації вимірювань.

Конденсаційний метод належить до прямих методів, заснованих на конденсації пари при охолодженні вологого повітря з наступним

иміром кількості конденсату, що утворився. Основна методична похибка полягає у тому, що частина вологи не конденсується. Тому, для підвищення точності методу, вологу, що уноситься повітрям, визначають розрахунково:

$$X_0 = E_t / (P - E_t) + (V_k / V_v) \cdot (760 / (P - E_t)) \cdot (T / 273), \quad (9.3)$$

де X_0 — об'ємний вологовміст; E_t — тиск насиченої водяної пари при температурі T ; T — температура охолодженого повітря; P — тиск повітря при його виході з теплообмінника; V_k — об'єм конденсату в перерахунку на об'єм пара при 273 К та 1033 мб; V_v — об'єм повітря, що виходить з теплообмінника.

Прилад складається з теплообмінника, вимірників температури, тиску, об'єму повітря і кількості конденсату. Усі вони можуть слугувати джерелами інструментальних похибок.

Переваги приладу — його придатність для вимірів в умовах великого вологовмісту і при високій температурі. Загальна погрішність невелика.

До прямих методів вимірювань належить і **кулонометричний**. Мірою оцінки вологості є кількість електрики, що витрачена на електроліз поглиненої вологи. Відомо, що електроліз 93,5 мкг води вимагає 1 К електрики. Відомий і об'єм повітря, що бере участь у процесі виміру. Кулонометричний гігрометр складається з побудника витрат, витратоміра, електролітичного стільника, джерела постійної напруги і мікроамперметра. Електролітичним стільником слугує трубка з хімічно стійкого електроізоляційного матеріалу, наприклад фторопласта. Всередині трубки розташовані два електроди з хімічно стійкого металу (платини), покриті плівкою з особливо активного сорбенту, наприклад фосфорного ангідриду. Повітря, витрата якого вимірюється, пропускають через трубку з постійною швидкістю. До електродів підводять напругу постійного струму. Величина струму залежить від кількості вологи, що поглинається сорбентом, який покриває електроди. Методична похибка породжується струмом, що виникає при відсутності вологого повітря і викликуваним специфічною каталітичною особливістю платинових електродів, а також наявністю хімічних домішок у повітрі — таких, як аміак, хлор, фтористий водень. Інструментальна похибка обумовлена неточністю виміру витрати повітря, що пропускається через стільник. Швидкість проходження повітря може змінюватися, бо при тривалій експлуатації порушується поверхня електродів і зменшуються сорбційні властивості поглинача. Навіть короткий опис методу свідчить про його експлуатаційні недоліки. Однак відносно невелика сумарна похибка вимірювань (5%) пояснює досить широке

застосування кулонометричних вологомірів та їхній випуск великими серіями.

Вимір вологості оточуючого людину середовища за допомогою прямих методів являє собою багатоопераційний і трудомісткий процес, що складається з забору повітря і сорбції вологи, та перетворення сорбованої вологи в стан можливої кількісної оцінки і т.д. Усе це утрудняє широке використання прямих методів вимірювань для комплексної оцінки середовища. Але у той же час прямим методам вимірювань завжди слід віддавати перевагу перед непрямими, і тому пошук явищ, за допомогою яких можна було б створювати гігрометри прямого виміру, цілком виправданий.

Побічні (непрямі) методи

Непрямими називають методи, в яких для оцінки кількості вологи у навколишньому середовищі використовується залежність властивостей повітря від концентрації водяної пари. Як приклад розглянемо метод теплопровідності. Гігрометр, заснований на цьому принципі, є різновидом названого газоаналізатора, що працює за принципом теплопровідності. Теплопровідність вологого повітря подібно до газової складової, при визначеній температурі і тиску залежить від вмісту вологи

$$\lambda_v = \lambda_n \alpha + \lambda_c (1 - \alpha), \quad (9.4)$$

де λ_v , λ_n і λ_c — відповідно теплопровідність вологого повітря, водяної пари та сухого повітря; α — вміст вологи у частках одиниці.

Схема вимірювань і конструкція гігрометра теплопровідності аналогічна відповідним газоаналізаторам. Вони мають ті ж чотири плечі з чотирма стільниками опору. Відмінність складається у підбиранні опорів вимірювального і контрольного стільника. Прилад враховує розбаланс вимірювального моста і вказує склад вологи. Переваги методу — можливість його використання для авто- і телеметрії, а це означає, що гігрометр, який працює на принципі вимірювання теплопровідності залежно від вмісту вологи, може бути використаний у системах автоматичного регулювання мікроклімату в приміщеннях. Джерелом методичної похибки є вплив різного виду домішок, що знаходяться у будь-якій фазі, температури і тиску на величину сумарної теплопровідності. Інструментальна похибка невелика — вона не перевищує похибки звичайного вимірювального моста, а сумарна складає кілька відсотків.

Спектриметричний метод заснований на тому, що спектр поглинання водяної пари в інфрачервоній області має кілька зон поглинання з центрами приблизно λ , рівними 0,94; 1,1; 1,38; 1,87; 2,7; 3,2; 3,6; 6,3 мкм.

Інтенсивність випромінювання на частоті V , що проходить через поглинаюче середовище, змінюється за таким експонентним законом

$$I_v = I_0 \exp(-R_v al), \quad (9.5)$$

де I_0 та I_v — інтенсивність випромінювання, що падає на пробу газу, який пройшов крізь нього; R_v — коефіцієнт поглинання на частоті v ; a — абсолютна вологість газу; l — довжина оптичного шляху.

Поглинання

$$A_v = (I_0 - I_v) / I_0 = 1 - \exp(-R_v al). \quad (9.6)$$

На реальну величину поглинання впливають такі фактори: геометрична довжина шляху, температура, тиск газу, наявність сторонніх домішок. Тому використовують функцію поглинання, отриману експериментально. Для усунення похибок від впливу домішок використовують спосіб порівняння поглинання досліджуваного газу на двох ділянках спектра. Довжину хвиль підбирають так, щоб перша з них знаходилася у смузі інтенсивного поглинання водяною парою, а друга, досить близька до першого, — поза цією смугою. Величину поглинання зазвичай вимірюють за положенням оптичного клину, що компенсує зміну інтенсивності випромінювання у вимірювальному каналі приладу. Інтенсивність поглинання можна також реєструвати за допомогою оптико-акустичного ефекту.

У гігromетрії використовується й ультрафіолетова область спектра. Розроблено прилади, що використовують лінію α серії Лаймана випромінювання водню. Основний їхній недолік — малий термін служби джерел випромінювання. Останнім часом як джерела випромінювання почали застосовувати оптичні квантові генератори.

Переваги спектрометричного методу — висока чутливість, безінерційність.

Недоліки — складність приладів, чутливість до зовнішніх умов і сторонніх домішок.

Диелькометричний метод заснований на залежності діелектричних властивостей газу від вологовмісту. Запропоновано емпіричні формули залежності показника переломлення повітря від парціального тиску водяної пари

$$N = 77,6 (P - e) / T + 72e / T + 3,75 \cdot 10^5 e / T^2, \quad (9.7)$$

де P та e — повний та парціальний тиск водяної пари, мб;

T — температура, К.

Відносна вологість повітря вимірюється у відсотках:

$$\varphi = 2,68 \cdot 10^{-4} T / E(TN - 77,6P), \quad (9.8)$$

де E — тиск насиченої пари при температурі T , мб.

Точність методу на частоті до 50 МГц невелика. На СВЧ частотах (до 30 ГГц) при ретельному виготовленні приладу похибка може бути знижена приблизно до 1% відносної вологості при 20 °С. Переваги СВЧ-методу — висока чутливість і точність, висока швидкодія, відсутність впливу на досліджуваний газ. Недоліки методу — складність і висока вартість вимірювальної апаратури, необхідність стабілізувати температуру і тиск повітря або компенсувати їхній вплив. Похибки можуть виникати через забруднення, краплинну вологу, пари полярних рідин, інших газів у аналізованому повітрі.

Термодинамічні методи

Вагопереніс вода — пар супроводжується теплопереносом за рахунок схованої теплоти паротворення. Швидкість перенесення ваги визначається температурою випаровуючої поверхні, і тиском пари у навколишньому середовищі. Цю залежність використовують при вимірі вологості повітря за допомогою декількох термодинамічних методів.

Психрометричний метод — один з найпоширеніших — заснований на залежності між пружністю водяної пари і різницею показань сухого і змоченого термометрів (рис. 9.2) [38, 39].

Ця залежність виражається напівемпіричною психрометричною формулою

$$E = E_M - AP(T_c - T_{3M}), \quad (9.9)$$

де T_c и T_{3M} — температура сухого та змоченого термометрів відповідно;

E_M — тиск насичення водяної пари при температурі T_{3M} ; P — атмосферний тиск; A — психрометричний коефіцієнт.

Величина психрометричного коефіцієнта залежить від конструктивних особливостей психрометра (розміру і форми чутливого елемента термометра, теплопровідності його оболонки, виду захисту від радіації), а також від стану тканини, що змочується. Найбільшою мірою A залежить від швидкості обдування змоченого термометра.

Для підвищення точності вимірювань вологості створюють примусовий обдув термометрів. Але при швидкості обдування, що перевищує 3 м/с, психрометричний коефіцієнт перестає залежати від нього і дорівнює 0,000662 (рис. 9.3). З причини того, що теоретично поки що не можливо

врахувати всі фактори, які впливають на величину психрометричного коефіцієнта, експериментальні різних авторів щодо величини A є різними[3].

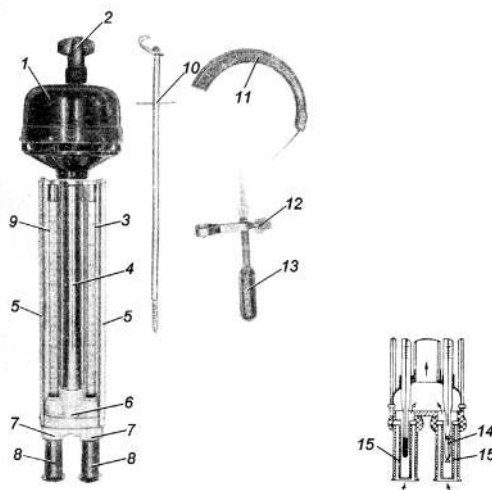


Рис. 9.2. Психрометр Асмана: 1 — головка аспірагора; 2 — заводний ключ; 3, 9 — мокрий та сухий термометри; 4 — трубка; 5 — планкові захисти; 6 — трійник; 7 — пластмасові втулки; 8 — захисні трубки; 10 — крючок; 11 — вітровий захист; 12 — затиск; 13 — гумова груша; 14 — батист; 15 — внутрішні трубки

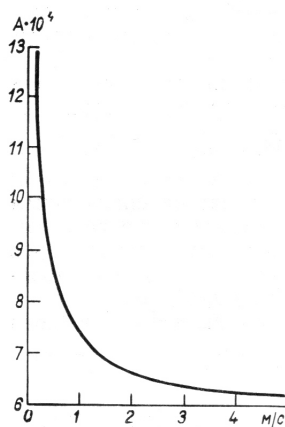


Рис. 9.3. Залежність психрометричного коефіцієнта від швидкості руху повітря у випаровуючій поверхні

Похибка вимірювання вологості повітря психрометром визначається похибками вимірювань температур T_c і $T_{зм}$, атмосферного тиску P і, нарешті, залежність A від зовнішніх умов. Психрометр чутливий до забруднень гніта, особливо гігроскопічними солями.

Чутливість і точність психрометра знижуються зі зменшенням температури навколишнього середовища. Постійна часу психрометрів складає від 1 до 3 хв.

До основних методів вимірювань вологості належить і **метод вимірювань за «точкою роси»**[3]. Цей метод заснований на принципі Реньо. Його сутність полягає у тому, що в умовах рівномірного охолодження деякого об'єму вологого повітря при постійному сумарному тиску парціальний тиск складових газового складу повітря й водяної пари залишається постійним до моменту насичення, тобто до початку переходу водяної пари з газоподібної фази в рідку. При цьому існує залежність тиску насиченої водяної пари над плоскою поверхнею води від температури. Визначення парціального тиску, що те ж саме, оцінка вологості навколишнього середовища, зводиться до вимірювання температури насичення. Про насичення можна судити з появи водяної плівки або з незмінної її товщини на плоскій поверхні. Задача виміру сталості товщини плівки має розв'язок.

Таким чином, для вимірювання вологості по методом «точки роси» треба мати поверхню, на якій конденсується волога при зміні температури, пристрій для зміни температури цієї поверхні (підігрівач та охолоджувач), вимірювальну систему для фіксації моменту появи вологи на конденсаційній поверхні або пристрій для контролю товщини водяної плівки і, нарешті, засіб для вимірювання температури осадження конденсату. Поверхнею, призначеною для осадження конденсату, служить відполірована чи гальванічно оброблена пластина. Поява конденсату в найпростіших гігрометрах виявляється візуально.

В автоматизованих гігрометрах точки роси момент появи конденсату визначається за зміною величини відбитого чи розсіяного світлового потоку. Сигнал, що свідчить про розсіювання світлового променя, може бути використаний для автоматичної підтримки температури поверхні вимірювальної пластини на рівні точки роси.

Момент появи конденсату на пластині можна фіксувати й іншими методами, зокрема кондуктометричним. Але застосування кондуктометрії вимагає заміни металевої пластини ізоляційною, на яку наноситься струмопровідний шар, що слугує електродом. Зміна поверхневого опору, що відбувається з появою конденсату, дозволяє одержати електричний

сигнал, який використовується у системі регулювання температури пластини для підтримки її на рівні точки роси. Для цього ж можна використовувати поглинання α - або β - випромінювання радіоактивного ізотопу малої енергії. Зміна величини поглинання або відбиття проникаючого випромінювання також нескладно застосувати в системі регулювання температури пластини. Різноманітними є системи підігріву чи охолодження. Широко застосовується термоелектричний ефект, причому температуру пластини вимірюють за допомогою термісторів чи термопар. Конструкція вимірника температури повинна забезпечувати мінімальний перепад температури між поверхнею осадженого конденсату і термометрів.

Джерелом методичної похибки є поступове забруднення поверхні пластини. Інструментальна похибка обумовлюється неточностями при вимірюванні температури і при фіксації моменту появи конденсату.

Основною перевагою методу за **«точкою роси»** є висока точність вимірювань. Похибка не перевищує частку відсотка навіть у широкому діапазоні температур і тисків. Істотний недолік — багатоопераційність вимірювань і складність використовуваної апаратури.

Термоелектролітичний метод аналогічний методу точки роси[3]. Різниця лише у тому, що визначається температура рівноваги водяної пари у навколишньому середовищі і насиченому розчині якої-небудь речовини. Розчинення будь-якої речовини у воді відповідно до закону Рауля веде до зниження тиску насиченої водяної пари над поверхнею розчину при постійній температурі. Насиченому розчину при цій температурі відповідає цілком визначений тиск насичення водяної пари. Для насичених розчинів різних речовин існує визначена залежність тиску насиченої водяної пари від температури. Знаючи цю залежність і визначивши рівноважну температуру системи пар — розчин — тверда речовина, можна визначити тиск пари у навколишньому середовищі.

У гігromетрії часто використовують розчини солей. Електропровідність розчину солі дозволяє легко виявляти конденсат і стежити за зміною його маси. Сталість електропровідності розчину відповідає сталості його маси, що вказує на досягнення рівноважної температури. Найбільшого поширення серед солей, застосовуваних у гігromетрії, одержав хлористий літій. Ця сіль має високу гігроскопічність. Рівноважна відносна вологість для неї близько 12%. Це означає, що при відносній вологості навколишнього середовища вище 12% хлористий літій поглинає вологу, і для досягнення рівноважної температури достатньо тільки підігріву, що значно спрощує задачу терморегулювання. Більшості хлористолітєвих датчиків вологості

для підігріву потрібний електричний струм, що протікає через електроліт. Такий спосіб не вимагає для автоматичної підтримки температури розчину на рівноважному рівні якого-небудь іншого пристрою, крім джерела перемінної напруги. Хлористолітєві підігрівні датчики взаємозамінні, досить надійні, мало чутливі до запилення і забруднення. Похибка виміру вологості для цих датчиків складає 3–5%. Цікавий варіант приладу для виміру вологості за переходом газоподібної фази вологи у рідку створив С. П. Демичев (рис. 9.4)[3].

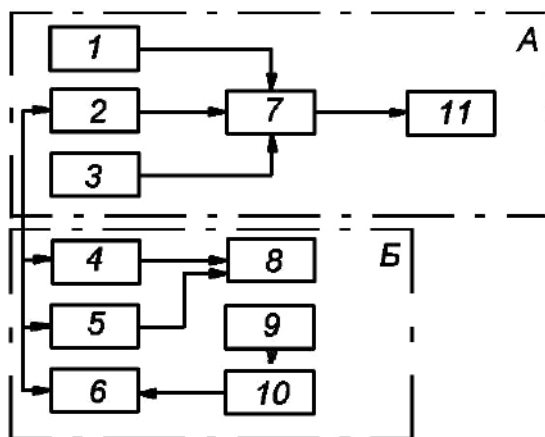


Рис. 9.4. — Функціональна схема гігрометра: а — вимірювальна частина схеми; б — система автоматичного регулювання температури; 1 — термометр навколишнього повітря; 2 — термометр вологочутливого елемента; 3 — термометр компенсаційний; 4 — вологочутливий елемент; 5 — термометр стабілізації товщини шару конденсату; 6 — термобатарея; 7 — схема вироблення сигналу відносної вологості повітря; 8 — схема порівняння; 9 — підсилювач; 10 — фазочутливий детектор; 11 — показуючий прилад

Як вологочутливий елемент був обраний монокристал хлористого натрію, оскільки його рівноважна відносна вологість майже не змінюється у широкому діапазоні температур.

Отже, якщо за допомогою регулятора температури зберігати на вологочутливому елементі постійна кількість вологи, то мірою відносної вологості може служити різниця температур. У наведених розрахункових значеннях рівноважної відносної вологості f хлористого натрію використані

значення тиску P насиченої водяної пари залежно від температури T насиченого розчину хлористого натрію (табл. 9.1).

Таблиця 9.1. — Залежність тиску P насиченої водяної пари залежно від температури T насиченого розчину хлористого натрію)[3]

$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм рт.ст.}$	$f, \%$	$T, ^\circ\text{C}$	$P, \text{мм рт.ст.}$	$f, \%$
0	3,5	76,4	60	112,0	75,0
10	6,9	74,9	70	175,0	74,9
20	19,2	75,3	80	262,9	74,7
30	23,2	75,1	90	391,6	77,6
40	41,6	75,2	100	564,0	74,4
50	69,3	75,1			

Ці дані показують стабільність рівноважної відносної вологості, що виправдує вибір як вологочутливий елемент кристал хлористого натрію та спрощує схему вимірювань. Описуваний гігрометр належить до групи приладів гіротермічної рівноваги і є варіантом приладу точки роси. Сигнал розбалансу вимірювального моста, одним із пліч якого є монокристал хлористого натрію, пускає в хід терморегулятор, а різниця між рівноважною температурою кристала і температурою навколишнього середовища дозволяє оцінити величину вологості навколишнього середовища та її зміни, якщо вони відбуваються. На рис. 9.4 показана схема, що була використана при створенні приладу і яка дозволила вимірювати температуру і її зміни при малих розмірах кристала та наявності на поверхні вологочутливого елемента такого агресивного агента, як розчин хлористого натрію. У схемі гігрометра температуру монокристала вимірювали термометром з чутливим елементом з мідного дроту, розташованим на корпусі вимірювальної камери.

Методична похибка гігрометра відносної вологості, що працює на гіротермічній рівновазі, викликає забруднення кристала. Розташування приладу обумовлює оптимальну усереднену оцінку вологості у навколишньому середовищі з урахуванням турбулентності переміщення повітря. Динамічна похибка зв'язана з інерційністю регулятора температури.

Джерелами інструментальної похибки можуть бути: неоптимальний вибір матеріалу камери, ненадійність теплового контакту монокристала з вимірювальною камерою, недостатня чутливість термометра і неточність вимірювального приладу. Загальна похибка приладу не перевищує на практиці декількох відсотків.

Сорбційні методи

У сорбційних методах вимірювання вологості використовується залежність властивостей твердих тіл і рідин від кількості сорбційної води, що знаходиться у рівновазі з водяною парою навколишнього середовища. Сорбційні датчики зазвичай прості, компактні, не роблять впливу на склад і температуру навколишнього середовища. Недоліки їх — індивідуальне градування, нестабільність характеристик, похибка від гістерезису, залежність вихідної величини від навколишньої температури.

Деформаційний метод використовує залежність розмірів чи форми чуттєвого елемента від вологості навколишнього середовища. Властивість знежиреного волосся людини змінювати свою довжину при зміні вологості навколишнього середовища була відома давно. Ще у 1783 р., коли Соссюр вперше виготовив гігрометр, він застосував знежирений волос як чутливий елемент. Як останній застосовують, крім знежиреного волосся, «тваринну» плівку, нейлон, капронову нитку. Для видалення натуральних жирів волосся спочатку вимочують в етиловому спирті, а потім промивають у дистильованій воді та піддають механічній обробці.

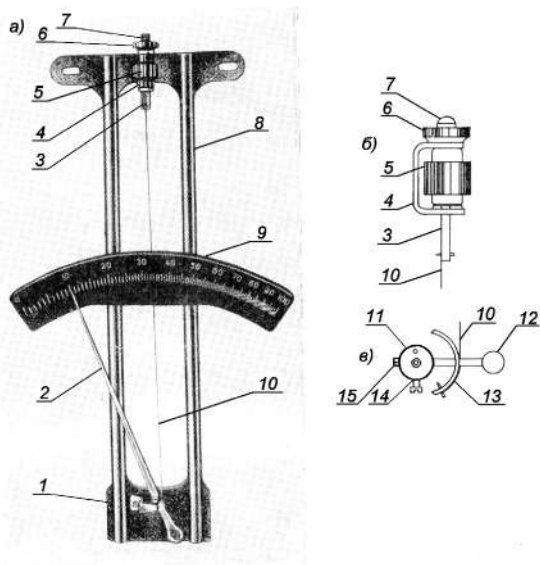


Рис. 9.5. Гігрометр волоссяний: а) загальний вигляд; б) вузол кріплення волоса до рамки; в) вузол кріплення стрілки; 1 — рамка; 2 — стрілка; 3 — хвостовик; 4 — скоба; 5 — гайка; 6 — контргайка; 7 — гвинт; 8 — рамка; 9 — шкала; 10 — волос; 11 — вісь стрілки; 12 — вантаж; 13 — кулачок; 14 — гвинт; 15 — стрижень.

При збільшенні або зменшенні довжини волоса спеціальний механізм пересуває показчик за шкалою. Час, необхідний для реакції волоса на зміну вологості, залежить від температури повітря (чим нижча температура, тим він більший). Хоча волосяний гігрометр є відносним приладом, але в зимовий час (при температурах нижче -10°C) він є основним приладом, за яким визначають вологість повітря. Будова гігрометра волосяного наведена на рис. 9.5[38, 39]. Цей метод вимірювання вологості широко використовують у метеорології. Подовження волоса ΔL при зміні відносної вологості від 0 до 100% складає 2,5% його довжини L та відбувається нелінійно, причому в діапазоні від 20 до 100% має майже логарифмічну залежність від відносної вологості.

Ваговий метод заснований на зважуванні сорбованої вологи і вимагає виміру невеликих змін маси. Зазвичай використовують частотні способи виміру. На баланс годинного механізму, на струну або кристал кварцового резонатора наносять шар сорбенту. Частота механічних коливань залежить від маси поглиненої вологи, що визначається вологістю навколишнього середовища. Найбільше поширення одержав п'єзокварцовий спосіб виміру вологості. Висока чутливість кварцового резонатора до змін маси дозволяє одержати поріг чутливості 0,1 ррт. Вплив тиску на показання приладів незначний. Джерелами похибок є зміна температури, гістерезис, присутність газів, що адсорбуються на поверхні датчика.

У кондуктометричному методі використовують явище зміни поверхневого чи об'ємного опору гігроскопічного матеріалу від вологості навколишнього середовища. Відома велика кількість датчиків, що використовують різноманітні вологочутливі матеріали. Найбільшого поширення набули електrolітичні резистивні датчики. Вологочутливий шар містить гігроскопічну сіль, найчастіше хлористий літій. Сорбована волога і сіль утворюють розчин, концентрація якого залежить від вологості навколишнього середовища. Електропровідність розчину зв'язана з концентрацією електроліту і служить мірою вологості навколишнього середовища.

В іншому приладі як активний елемент використовують шар окису алюмінію, який поглинає молекули водяного пара. Електричний опір датчика змінюється у межах трьох — чотирьох порядків і вимірюючи його можна визначити на основі існуючої залежності вологість повітря. Причому опір вимірюють на перемінному струмі низької частоти, що сприяє зменшенню впливу процесів поляризації. Такі гігрометри з розробленими оксидно-алюмінієвими первинними перетворювачами можуть забезпечити вимірювання у діапазоні від 0–100% вологості при температурі від -70 до $+$

50 °С, основна наведена квадратична погрішність 2%, систематична температурна дорівнює 0,4% на 1 °С. Датчики відрізняються малими розмірами, практично не впливають на стан контролюваного газу, дозволяють проводити вимірювання у малих об'ємах.

Ємнісний метод використовує залежність діелектричної проникності або діелектричних втрат гігроскопічного матеріалу від вологості навколишнього середовища. Відомі ємнісні датчики на основі алюмінію. На поверхні алюмінію анодуванням створюється пориста оксидна плівка. На неї напилюється тонкий вологопроникний шар золота або алюмінію. Алюмінієва підкладка і напилений шар слугують обкладками конденсатора, ємність якого залежить від вологості навколишнього середовища.

Оптичний метод заснований на тому, що оптичні властивості деяких матеріалів міняються від вологості навколишнього середовища. У США ще у другій половині 20-го ст. був запатентований гігрометр, що використовує залежність коефіцієнта переломлення гігроскопічного матеріалу від вологості. Датчик являє собою світловод з негігроскопічного матеріалу, який вкритий чутливою до вологи плівкою. Геометрія світловода обрана так, що кут падіння світлового променя на межу двох середовищ близький до критичного. Інтенсивність відбитого променя залежить від співвідношення коефіцієнтів переломлення матеріалів світловода і чутливої до вологи плівки. Датчик має гістерезис у межах 2%. Температурний коефіцієнт 0,2% відносної вологості на 1°С. Інший прилад використовує зникнення подвійної променезаломлюваності чутливого до вологи матеріалу при досягненні визначеного рівня вологості. Проте такий прилад може служити лише індикатором.

Колірний датчик використовує залежність кольору паперу, просоченого розчином хлористого кобальту, від вологості навколишнього середовища. Цей метод зазвичай застосовують для контролю вологості всередині герметичних контейнерів. За допомогою колірної шкали можна визначати вологість із похибкою $\pm 5\%$.

Реєстрація вологості повітря. Гігрографи.

Для безперервної реєстрації змін вологості повітря використовують гігрографи. Вони бувають двох видів: волосяні (чутливий елемент — волос) та плівкові (чутливий елемент — органічна плівка).

9.3. Метрологія і загальна оцінка гігрометрів

Метрологія гігрометрів знаходиться у стадії формування, тому що дуже складно виділити вологість навколишнього середовища в самостійну фізико-математичну модель, що піддається вимірюванню. Складність ця пояснюється тим, що критерій оптимальної вологості навколишнього середовища залежить від безлічі його факторів і параметрів, вивчення ж комплексного впливу середовища на людину ще тільки починається і проходить з чималими труднощами через відсутність приладів, а також і гігрометрів, що мають достатню точність. Отже, необхідно для дослідника мати хоча б загальне уявлення про гігрометри та їхні можливості.

Наведені дані дозволяють вибрати потрібний тип гігрометра, скласти і сформувати математичну і фізичну модель навколишнього середовища. Результати комплексного приладового вивчення, у свою чергу, внесуть корективи у вимоги, пропоновані до гігрометрів.

Оцінюючи методи і прилади у цілому, можна сказати, що група **прямих методів** виміру вологості має найбільшу точність, але складна за технологією виміру і трудомістка. **Непрямі методи** менш точні, а процес виміру також складний. На точність виміру впливають зміни зовнішніх умов, які врахувати важко. Однак наявність окремих поодиноких переваг виправдовує застосування непрямих методів. Для забезпечення точності потрібно ретельне попереднє калібрування. **Термодинамічні методи** поєднують досить високу точність виміру і конструктивну простоту, але в той же час не мають достатнього ресурсу. **Сорбційні методи** прості, мають швидкодію. Похибка вимірювання, обумовлена нестабільністю характеристик, вимагає індивідуального калібрування і контролю характеристик у процесі експлуатації. Сьогодні значення гігрометрів особливо зросло завдяки їхньому широкому застосуванню в комплексних інформаційно-вимірювальних системах. Можливість подібного використання виникає тоді, коли вихідний сигнал, що є мірою вологи, відповідає інформаційному сигналу інших параметрів. А будь-який електричний сигнал від перерахованих у додатку приладів за допомогою нескладної операції може бути перетворений у сигнал по напрузі, що знаходиться в межах від 0 до 5 В при лінійній еквівалентності напруги від величини відносної вологості і температури. Можливість одночасно вимірювати температуру і вологість істотно полегшує, здешевлює і підвищує якість комплексної оцінки навколишнього середовища, сприяє детальному вивченню впливу останньої на людину і відкриває перспективу оптимізації навколишньої нас природи.

У додатку 10 наведені характеристики деяких приладів для вимірювання вологості[53–59], зовнішній вигляд термогігрометрів Fluke-971[54] та Testo 608-H1[56] наведені на рис 9.6 та на рис 9.7 відповідно.



Рис. 9.6. Термогігрометр Fluke-971[54].



Рис. 9.7. Термогігрометр Testo 608-H1[56].

Контрольні запитання.

1. Що таке вологість повітря?
2. У чому відмінність абсолютної від відносної вологості?
3. На які групи залежно від фазового стану речовини поділяють методи вимірювання вологості повітря?
4. Які методи вимірювання вологості повітря належать до сорбційних?
5. У чому сутність вимірювання вологості повітря ваговим та деформаційним методами?
6. Які фізичні явища покладені в основу кондуктометричного, ємнісного, оптичного та колірного методів вимірювання вологості повітря?
7. Які методи вимірювання вологості повітря належать до термодинамічних?
8. Назвіть та охарактеризуйте найбільш поширений термодинамічний метод вимірювання вологості?
9. Які методи вимірювання вологості належать до побічних(непрямих), та коротко охарактеризуйте їх.
10. Які методи вимірювання вологості належать до прямих, та коротко охарактеризуйте їх.
11. За допомогою яких приладів здійснюють реєстрацію вологості?
12. Визначіть переваги та недоліки кожної з груп методів вимірювання відносної вологості.

ТЕМА 6. СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТИСКУ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ОБЛАДНАННЯ З ВАКУУМОМ ТА ПІДВИЩЕНИМ ТИСКОМ У РОБОЧОМУ ПРОСТОРИ

Лекція 10. Системи контролю тиску при експлуатації обладнання з вакуумом та підвищеним тиском у робочому просторі

ПЛАН

- 10.1. Вступ. Шкідливі та небезпечні фактори при експлуатації вакуумних систем.*
- 10.2. Основні методи вимірювання низького(вакууму)та високого тиску, датчики та прилади для контролю його рівня.*

10.1. Вступ. Шкідливі та небезпечні фактори при експлуатації вакуумних систем

З другої половини 20-го сторіччя вакуумна техніка і технології одержали широке поширення в науці, техніці і виробництві. Причому якщо спочатку вони застосовувались у виробництві електровакуумних та напівпровідникових приладів, то зараз вакуумна технологія використовується у легкій і харчовій промисловості для металізації дзеркал, тканин, папера, виробів із пластмас; обробці, сушінні і консервуванні продуктів харчування; металургії — плавка металів і сплавів; матеріалознавстві — термічний обробці, дифузійному зварюванні, одержанні дисперсно-зміцнених і шаруватих композиційних матеріалів методами вакуумної конденсації і дифузійного зварювання, власне дифузійне зварювання і пайка металів, скла, кераміки в різних комбінаціях, вирощуванні монокристалів тугоплавких металів і неметалів; у хімічній промисловості — кристалізація, просочення, сушіння; медицині — одержання лікарських препаратів. Нарешті, сучасні фундаментальні і прикладні дослідження в експериментальній фізиці неможливі без вакуумної техніки — це і прискорювачі заряджених часток (у тому числі великий адронний колайдер), електронні мікроскопи, установки термоядерного синтезу, імітація космічного простору в лабораторних умовах і багато іншого. Активний розвиток нанотехнологій також був би неможливий без використання вакуумної техніки.

Застосування вакуумної техніки у ряді випадків значно поліпшує екологічну ситуацію, тому що на цілі порядки зменшує кількість шкідливих викидів

на підприємствах електротехнічної, машинобудівної, металургійної, хімічної й іншої галузей промисловості. Разом з тим не можна не відмітити наявність небезпечних і шкідливих факторів, що мають місце при роботі вакуумного устаткування. Одним із небезпечних факторів при його роботі є можливість вибуху при порушенні герметичності охолоджуваних водою вузлів вакуумних електропечей. При цьому вода потрапляє в робочий простір печі, що тягне за собою утворення гримучої суміші та вибух. Механізм та кінетика вибуху визначаються складом елементів вибухової суміші. Зіткнення води з розплавленим металом в умовах вакууму призводить до випаровування води з одночасним різким збільшенням об'єму та тиску, таке перетворення має характер вибуху. До того ж вода при контакті з нагрітим більше 350 °С залізом (вуглецевими сталями) вступає з ним в реакцію $\text{Fe} + \text{H}_2\text{O} = \text{FeO} + \text{H}_2$ внаслідок чого утворюється надлишковий водень. Одночасно відбувається дисоціація води з виділенням водню та кисню. Їх суміш (гримучий газ) при загорянні вибухає. У деяких випадках вибух відбувається при руйнуванні скляного ковпака вакуумного лабораторного обладнання. Тому для попередження вибухів вакуумних печей та іншого обладнання необхідно знати основні методи вимірювання низького тиску (вакууму), види приладів та датчиків.

10.2. Основні методи вимірювання низького(вакууму) та високого тиску, датчики та прилади для контролю його рівня.

Зв'язок між станом розрідження газу та абсолютним тиском

Стан розрідження газу (вакуум) у відкачуємому об'ємі можна кількісно оцінювати абсолютним тиском, тобто силою, що діє на одиницю поверхні вимірювального елемента. Тоді поняття вакуум набуває сенсу звичайної фізичної величини, яку можна вимірювати в одиницях тиску.

Кількісною характеристикою вакууму також може служити різниця між атмосферним і абсолютним тиском усередині відкачуваного об'єму. Однак при цьому під вакуумом варто розуміти деяку розрідженість у порівнянні з атмосферним тиском.

На практиці користаються і першою і другою характеристикою вакууму, і їхній вибір визначається характером досліджуваного процесу. У тому випадку, коли хід процесу не зв'язаний із зовнішнім (атмосферним) тиском (наприклад, відкачка електровакуумного приладу), слід вимірювати абсолютний тиск усередині відкачуваного об'єму. Якщо ж стан системи визначається різницею між атмосферним P_a й абсолютним тиском усередині її $P_{аб}$ (наприклад, процеси, що відбуваються в деяких типах вакуумних

насосів), для її характеристики зручно користатися різницею тисків $P_a - P_{аб}$ тому що сила, що діє на робочий елемент системи, буде залежати від різниці між атмосферним і абсолютним тиском.

Діапазон та точність вимірювання низьких тисків.

Нижня межа розріджень, що досягаються на сьогодні, відсувається убік усе більш низьких тисків. У лабораторних умовах вже одержують вакуум порядку 10^{-17} мм рт. ст. Якщо цей рівень розрідження порівнювати з атмосферним тиском, то необхідно володіти приладами, що дозволяють вимірювати абсолютні тиски в діапазоні 20 порядків (при вимірюванні його в міліметрах ртутного стовпа).

Відповідно до сталої традиції прилади для вимірювань низьких тисків називають вакуумними манометрами або вакуумметрами. Тому звичайно не розрізняють за назвою прилади, які вимірюють абсолютні тиски безпосередньо (манометри), і прилади, що дозволяють судити про стан розрідження непряним шляхом — за залежністю деяких фізичних процесів від тиску (вакуумметри). Велике значення при конструюванні вакуумметрів мають вимоги до точності передбачуваних вимірювань. Природно, що похибки серійних промислових приладів, як правило, значно більше зазначених у додатку 11[60].

Джерелами помилок при вимірюванні низьких тисків є: відсутність достовірних даних про склад залишкового газу; виділення чи поглинання газу електродами і стінками датчика вакуумметра; поступова зміна у часі градуювальної кривої, що відбувається в результаті забруднення датчика, та ін. Тому вимірювання вакууму з тією точністю, що досягається в багатьох інших областях вимірювальної техніки, можливо тільки при дотриманні правил вакуумної гігієни й обліку всіх причин похибок. На практиці вимірювання вакууму, при яких можлива помилка у 2–2,5 рази, уже вважаються досить точними. Однак відносні зміни тиску можна вимірювати більшістю вакуумметрів з досить високою точністю.

Одиниці вимірювання низьких тисків

Найбільш розповсюдженою одиницею тиску у вакуумній техніці є міліметр ртутного стовпа (мм рт. ст.). Під тиском 1 мм. рт. ст. розуміють тиск, який створює вага стовпа ртуті висотою в 1 мм у стандартних умовах: $T = 0^\circ\text{C}$, нормальне прискорення сили ваги $g_a = 9,80665 \text{ м/с}^2$, густина ртуті $\rho_0 = 13,5951 \text{ г/см}^3$. Таким чином, $1 \text{ мм рт. ст.} = 1333,2239 \text{ дін/см}^2$ [60].

Одиниця тиску «міліметр ртутного стовпа» носить також назву «торр» на честь відомого італійського фізика Торрічеллі, першого дослідника тиску

повітря і винахідника *U*-подібного манометра. При визначенні тора була використана 1/760 частина нормальної (фізичної) атмосфери, рівної 1013250 дін/см². У результаті такого визначення 1 тор виявився менше 1 мм. рт. ст. на 10⁻⁷ частину своєї абсолютної величини, що практично не має ніякого значення.

Прийнята із січня 1963 р. Міжнародна система одиниць СІ передбачає для вимірювання тиску в будь-якому діапазоні (зокрема, у вакуумній техніці) одну одиницю — паскаль (ньютон на квадратний метр):

1 Па = 1 Н/м² = 0,0075 мм рт. ст., тоді 1 мм. рт. ст. = 133,322 Н/м². Звідси випливає зв'язок між вимірами того ж самого тиску в Паскалях і міліметрах ртутного стовпа p [Па] = 133,322 р. [мм рт. ст.].

Серед інших одиниць для вимірювання тиску необхідно назвати фізичну атмосферу (атм) (1 атм = 1,0333 кгс/см² = 760 мм рт. ст.), технічну атмосферу (ат) (1 ат = 1 кгс/см² = 735,52 мм рт. ст.) та бар (1 бар = 106 дин/см² = 750,06 мм рт. ст.). Проте ці одиниці, як і одиниця 1 мм вод. ст. = 0,073552 мм рт. ст., в вакуумній техніці застосовують рідко.

Іноді користуються логарифмічною одиницею тиску рА, обумовленою з рівності

$$pA = -\lg P$$

де p — тиск, виражений у фізичних атмосферах (760 мм рт. ст.). Звідси випливає, що одній логарифмічній одиниці (1 рА) відповідає тиск 76 мм рт. ст., 2рА = 7,6 мм. рт. ст., 3рА — 0,76 мм рт. ст. і т.д. Вочевидь, що нульовому значенню рА відповідає тиск 760 мм рт. ст.

Співвідношення між різними одиницями тиску подані в табл. 10.1[60].

Таблиця 10.1. — Одиниці вимірювання тиску.

Одиниці тиску	Н/м ² (Па)	ММ рт. ст. (торр)	Бар	Дін/см ² (мкбар)	Ат (кгс/см ²)	Атм (760 мм. рт. ст.)	ММ вод. ст.
Н/м ² (Па)	1	750·10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	10	1,02·10 ⁻⁵	0,98710 ⁵	1,0197·10 ⁻¹
мм рт. ст. (торр)	133,322	1	1,333·10 ⁻³	1333,22	1,36·10 ⁻³	1,316·10 ⁻³	13,595
Бар	10 ⁵	750	1	10 ⁻⁶	1,02	0,987	1,0197·10 ⁴
дин/см ² (мкбар)	10 ⁻¹	750·10 ⁻⁶	10 ⁻⁶	1	1,02·10 ⁻⁶	0,987·10 ⁻⁶	1,0197·10 ⁻²
ат (кгс/см ²)	0,981·10 ⁵	736	0,981	0,981·10 ⁶	1	0,968	1,000·10 ⁻⁴
атм (760 мм рт.ст.)	1,013 ·10 ⁵	760	1,013	0,013·10 ⁶	1,033	1	1,0332·10 ⁴
мм вод. ст.	9,8063	735,539·10 ⁻⁴	9,806·10 ⁻⁵	98,06	9,999·10 ⁻⁵	9,678·10 ⁻⁵	1

Вакуум у досліджуваному об'ємі можна характеризувати також молекулярною концентрацією, яка віднесена до кімнатної температури. Справді, тиск і концентрація молекул газу пов'язані співвідношенням:

$$P = (N/V)RT = nRT,$$

де n — концентрація молекул; T — абсолютна температура; p — тиск газу; N — кількість молекул в об'ємі V .

Тобто при тиску 1 мм. рт. ст. та $T = 20^\circ \text{C}$ у 1 см³ газу знаходиться $3,4 \cdot 10^{16}$ молекул. Звідси отримуємо

$$P = n_{0/(3,4 \cdot 10^{16})} = 2,9 \cdot 10^{-17}/n_0, \text{ мм рт. ст.}$$

де n_0 — молекулярна концентрація, віднесена до 20°C .

Класифікація приладів для виміру низьких і надлишкових тисків.

Прилади для виміру низьких тисків можна умовно розділити на п'ять груп, поклавши в основу класифікації фізичний принцип, який використаний у їхній роботі[60].

У першу групу входять прилади, в яких використовується механічний вплив тиску на вимірювальний елемент. До них належать гідростатичні і деформаційні манометри. Їх градувальні характеристики можуть бути розраховані з досить високою точністю, а градування не залежить від роду газу.

Робота другої групи манометрів заснована на використанні закону Бойля — Маріотта. Вона включає компресійний манометр і його різновиди.

В основі роботи третьої групи лежать закони кінетичної теорії газів (радіометричні і в'язкісні манометри), до неї належить також гіпсометричний метод визначення атмосферного тиску.

Четверта група поєднує всі теплові манометри, де використовується залежність теплопровідності газу від тиску. Представниками цієї групи є манометр опору, термопарний манометр і манометри розширення.

П'ята група є самою численною, куди входять всі іонізаційні манометри. Їхня робота заснована на використанні іонізації залишкового газу. До неї входять термоелектронні іонізаційні, магнітні електророзрядні і радіоізотопні манометри.

Діапазони тисків, вимірюваних згаданими вище типами приладів, показані на рис. 10.1[60]. Суцільними лініями зазначені діапазони вимірюваних тисків для промислових зразків приладів, пунктирними — діапазони тисків для приладів лабораторного зразка.

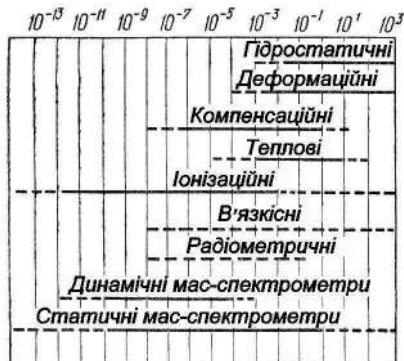


Рис. 10.1. Области тисків, що вимірюють різними типами вакууметрів[60]

На рис. 10.1 пунктирна лінія позначає лабораторні зразки, суцільна – промислові вироби(шкала у мм рт. ст.).

Механічні манометри

Гідростатичні (рідинні) манометри у недалекому минулому (початок 20-го ст) були єдиними приладами для вимірювання тиску при дослідженні газових потоків малих швидкостей. Вони застосовувались для вимірювання атмосферного тиску, розрідження, невеликого надлишкового тиску, зазвичай $\leq (4...5) \cdot 10^5$ Па, та малих абсолютних тисків (манометри Мак-Леода) [42]. У рідинних манометрах ефективна площа, що сприймає тиск дорівнює поверхні рідини, залитої у порожнину манометра, а зусилля, що протидіє тиску, створюється силою тяжіння рідини. Ці величини легко визначаються та можна добитися, щоб їх зміни у часі під дією зовнішніх факторів були мінімальними. Це забезпечує малі похибки та стабільні показання рідинних манометрів.

Манометричні рідини повинні задовольняти таким вимогам:

1. Нешкідливість для обслуговуючого персоналу.
2. Хімічна інертність в відношенні матеріалів, що використовуються у манометрах.
3. Мала в'язкість.
4. Малі температурні розширення.
5. Мала величина капілярної постійної.
6. Слабка випаровуваність та низька властивість поглинання вологи з оточуючої атмосфери.
7. Зберігання у часі кольору, прозорості та рідкого стану.

8. Слабка властивість адсорбувати бруд.

9. Невисока ціна.

Указані вимоги переслідують мету знизити похибки вимірювання тисків, бо при задоволенні цим вимогам зберігається стабільною густина рідини, зменшуються температурні похибки та похибки нульових показань, збільшується швидкодія. У додатку 12[42] наведені характеристики та властивості деяких рідин, які найбільш часто використовують для вимірювання надлишкових тисків.

Відомі й інші рідини, густина яких перевищує густину води, але вони з причин токсичності та шкідливої дії на метали і гуму не знайшли широкого застосування у вимірювальній техніці. Це бромистий етил, бромистий етилен; їх суміш у пропорції 1 : 3; тетраброметан, рідина Туле (розчин двоїдистої ртуті у йодистому калії); бромоформ; боровольфрамово-кислий кадмій; розчин Рорбаха (насичений розчин комплексної солі йодистого барія та двоїдистої ртуті). У додатку 13[42] наведені характеристики та властивості рідин, які використовують для вимірів низьких абсолютних тисків. Особливістю цих рідин є мала величина тиску насичених парів, яка сприяє їх швидкій відкачці у вакуумі.

Крім зазначених у додатку 13, використовують також диметилфталат (диметилловий ефір фталієвої кислоти), ефіри метафенилендиуксусної кислоти, поліоргансилоксанові рідини та інші.

Принцип дії гідростатичних (рідинних) манометрів заснований на використанні закону сполучених посудин. Найпростіший манометр являє собою трубку, вигнуту у вигляді букви *U* і заповнену ртуттю або якою-небудь іншою рідиною з низькою пружністю пари (рис. 10.2, *a*)[60].

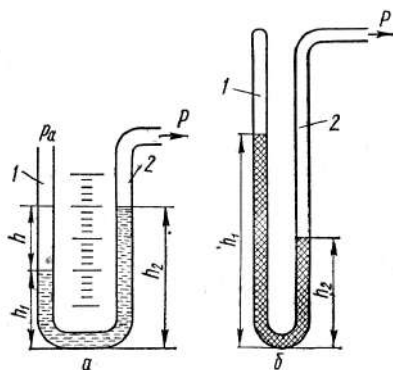


Рис. 10.2. *U* — подібний рідинний манометр: *a* — відкритий; *б* — закритий[60].

Якщо коліно 2 приєднати до об'єму, у якому створене розрідження, оцінюване абсолютним тиском p , то під впливом атмосферного тиску p_a рівень рідини зміститься так, що у коліні 2 він підвищиться, а у коліні 1 — понизиться. Виниклий перепад рівнів і буде давати зведення про різницю тисків $p_a - p$, що врівноважується гідростатичним тиском різниці висот стовпа рідини у колінах манометра,

$$p_a - p = \rho g (h_2 - h_1), \quad (10.1)$$

де p — густина рідини при даній температурі; g — прискорення сили ваги в тому місці, де проводиться вимір; $h_2 - h_1$ — різниця рівнів у колінах.

З рівняння (10.1) видно, що для оцінки таким приладом абсолютного тиску необхідно незалежним шляхом, наприклад звичайним барометром, вимірювати атмосферний тиск. Тоді

$$p = p_a - \rho g (h_2 - h_1) = p_a - \rho g h. \quad (10.2)$$

Показання U — подібного манометра, у якого одне коліно запаiane і заповнене рідиною (рис. 10.3, б), не залежать від зовнішнього атмосферного тиску. Дійсно, при відкачці закритого манометра тиск над поверхнею рідини у запаянному коліні трубки не буде перевищувати тиску її насиченої пари при кімнатній температурі, тому можна прийняти $p_a = 0$, і вираз (10.1) набуває вигляду

$$P = - \rho g (h_2 - h_1) = \rho g h \quad (10.3)$$

З формул (10.2) і (10.3) видно, що розрідженість або абсолютний тиск, вимірювані U — подібними манометрами, пропорційні густині робочої рідини і різниці рівнів в обох колінах.

Довжина трубок у манометрах, що вимірюють тиск починаючи з атмосферного і нижче, повинна бути такою, щоб висота стовпа робочої рідини врівноважувала атмосферний тиск. Тому в U — подібних манометрах, з метою зменшення їхніх лінійних розмірів, як робочу рідину найчастіше застосовують ртуть. Вона має найбільшу густину ($\rho = 13,55 \text{ г/см}^3$ при 20°C) і не змочує скло. Використання ртуті спрощує також процес вимірювання тиску, при якому різниця рівнів ртуті в трубках, виражена у міліметрах, відразу дає дані про тиск у міліметрах ртутного стовпа. Коли потрібно вимірювати тиск, що не перевищує декількох десятків міліметрів ртутного стовпа, немає необхідності користатися «повнометражним» U -подібним манометром і його роблять укороченим.

Нижня межа тиску для більшості U — подібних манометрів з ртутним заповненням залежить від можливості точного підрахунку різниці рівнів у колінах і практично не може бути нижче 1 мм рт. ст. Для підвищення чутливості цих манометрів в області низьких тисків (<1 мм рт. ст.) доцільно використовувати робочі рідини з меншою густиною, ніж у ртуті (додаток 9). Заміна ртуті мастилом збільшує його чутливість у приблизно у 15 разів.

Похибка вимірювання тиску рідинним манометром залежить від похибок, допущених при вимірюванні густини і висоти стовпа рідини у манометрі. Похибку відліку положення меніска неозброєним оком при гарній металевій чи дзеркальній шкалі з ціною розподілу 1 мм, коли прийняті міри до виключення похибки від паралакса, може бути оцінена і 0,25...0,5 мм. Похибка відліку в експлуатаційних умовах у експериментатора середньої кваліфікації не може бути вище половини ціни розподілу шкали і складає 0,5...1 мм. У U -подібному манометрі необхідно зробити два відрахунки, отже, зазначена похибка повинна бути подвоєна.

Похибка у визначенні густини рідин, найбільше часто використовуваних у манометрах, дуже мала. Значення густини може бути з таблиць, а при сумніві в чистоті рідини з великою точністю перевірена ареометром. Унаслідок цього щільність практично не впливає на точність виміру тисків U -подібним манометром. Точність визначається в основному похибкою виміру висоти стовпа рідини

Похибка відліку неозброєним оком задовольняє вимогам більшості практичних задач, при розв'язанні яких діапазон вимірюваних тисків точно погоджений з можливостями манометра.

Для виміру малих тисків, що викликають переміщення рідини на висоту в кілька десятків або одиниць міліметрів, манометр обладнується спеціальними оптичними пристосуваннями для відрахунку у вигляді збільшувального скла і ноніуса з похибкою 0,5...0,1 мм або відлік проводиться за допомогою катетометра з похибкою 0,02 мм. Ще більш висока точність досягається при застосуванні інтерференційного методу відліку (10^{-5} мм).

З наведених у додатку 10 рідин найбільшого застосування при позитивних надлишкових тисках мають ртуть і спирт. Рідше застосовується вода, що викликає корозію металевих деталей.

Рідини, величина щільності яких лежить між щільністю спирту і ртуті, застосовуються у випадках, коли чутливість ртутного манометра $dh/d(p_2 - p_1)$ недостатня, а діапазон виміру манометром, залитим спиртом чи водою,

менше діапазону зміни вимірюваного тиску. Рідини з щільністю більше 1000 кг/м^3 у різний час застосовувалися для часткової заміни ртуті. З них найбільшого поширення набули тетраброметан і рідина Туле[42]. Однак широкого застосування ці рідини не набули, тому що жодна з них не задовольняє всім перерахованим вище вимогам до рідин, що заливаються в манометри. При найбільш поширеній висоті лабораторних рідинних манометрів, що дорівнює 3 м, манометри, залиті різними рідинами, мають діапазони виміру тисків, зазначені у табл. 10.2. Для того щоб використовувати при вимірах усю довжину трубки і запобігти при різкій зміні тиску викид рідини з манометра у приміщення чи у сполучну трасу, в конструкції манометра передбачаються розширення трубок у верхній прийомній частині)[42].

Таблиця 10.2. — Діапазони тисків залежно від виду рідини, що залита в манометр

Рідина	Густина при 20°C кг/м^3	Діапазон вимірювання тисків, 10^{-5} Па
Ртуть	13 546	4
Тетраброметан	3 420	1
Чотирихлористий вуглець	1 590	0,45
Рідина Туле	3 180	0,95
Вода	998,2	0,3
Спирт етиловий	789,0	0,23

Прилади для вимірювання тиску атмосферного повітря

У метеорології атмосферний тиск вимірюють найбільш точними стандартними приладами — **ртутними барометрами**[37–39]. Ртутні барометри являють собою дві сполучені посудини, заповнені ртуттю, одна з яких — скляна трубка довжиною близько 0,9 м, яка запаена зверху і не містить повітря. Ртутний барометр показує атмосферний тиск як висоту ртутного стовпа, яку можна виміряти по прикріпленій поруч шкалі. Залежно від форми сполучених посудин ртутні барометри поділяють на 3 основних типи: чашкові, сифонні й сифонно-чашкові(рис. 10.3). На практиці використовують чашкові й сифонно-чашкові барометри. На метеорологічних станціях використовують станційний чашковий барометр. У деяких умовах доцільно використовувати **гіпсотермометр (термобарометр)**, для реєстрації атмосферного тиску застосовують **барографи**.

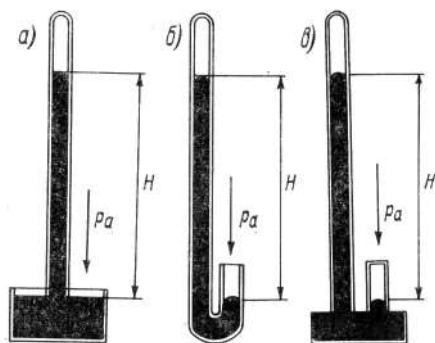


Рис. 10.3. Типи ртутних барометрів[37]: а — чашковий; б — сифонний; в — сифонно-чашковий.

Деформаційний (механічний манометр)

У деформаційних манометрах мірою тиску є пружна деформація чутливого елемента (спіральна трубка, мембрана) під дією приложеної до неї різниці тиску. Цю деформацію можна пов'язати з градуйованим вказівником і, таким чином, зробити можливим відрахування тиску по шкалі. Деформаційні манометри розрізняють не тільки за типом пружного елемента, але і за способом вимірювання деформацій.

Плоскі мембрани мають високу частоту власних коливань і використовуються у безпорожнинних датчиках перемінних тисків, у яких вимірюваний тиск безпосередньо впливає на мембрану. Для цього вони встановлюються на одному рівні з поверхнею стінки газового каналу. Вони знайшли широке застосування в різних електричних датчиках тиску.

Гофровані мембрани володіють меншою власною твердістю у порівнянні з плоскими мембранами. З гофрованих мембран виготовляють мембранні коробки, які широко використовують у реостатних контактних датчиках тиску. Для одержання ще більших переміщень коробки поєднують у блоки чи застосовують сильфони, широко використовувани в різних спеціальних приладах для вимірювання тисків у газових потоках. Сильфон являє собою тонкостінну трубку з гофрованою бічною поверхнею. Переміщення твердого центра сильфона, так само як твердого центра мембрани, використовується для безпосереднього впливу на механічну передатну систему і відліковий пристрій або перетворюється в електричний сигнал. Сильфони виготовляються з мідно-нікелевих сплавів і сталі. Сильфони зі сталі випускаються на тиск до $\sim 2 \cdot 10^6$ Па (20 кгс/см²). Цей тиск

є верхньою границею застосування сильфонів у схемах манометрів для вимірювання надлишкових тисків.

Однак у механічних манометрах для виміру тиску від $\sim 10^5$ до $\sim 10^8$ Па більш широкого застосування знайшли чуттєві елементи у вигляді профільованих трубок Бурдона еліптичного овального перетину. Принцип дії таких манометрів полягає у тому, що під впливом тиску, поданого в трубку, вигнуту по окружності і закріплену одним кінцем, вона намагається випрямитись і її вільний заглушений кінець починає переміщатись. Це переміщення, перетворене в обертання стрілки, служить мірою тисків. Трубочаті манометри виготовляються різних класів (0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0), розмірів (діаметр 0,04; 0,06; 0,1; 0,16 та 0,25 м) та призначень.

Будова простого трубчатого манометра (Бурдона) показана на рис. 10.4.) [60]

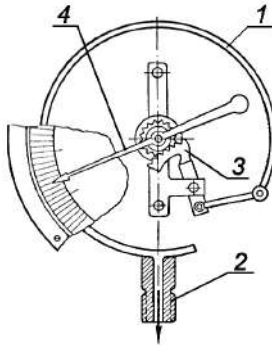


Рис. 10.4. Трубчатий деформаційний манометр: 1 – сплющена трубка; 2 – штуцер; 3 – зубцюватий сектор; 4 – стрілка-показчик

Як чутливий елемент застовується по дузі окружності сплющена трубка 1, один кінець якої запаятий, а інший за допомогою штуцера 2 приєднується до вакуумної системи. Під дією різниці тисків (атмосферного p_a і вимірюваного p) кінець трубки 1 зміщується і, будучи зв'язаний системою важелів із зубцюватим сектором 3, приводить в обертання стрілку-показчик 4.

При лінійному градуюванні приладу кут повороту стрілки пропорційний різниці тисків $p_a - p$. Отже, тиск в об'ємі, до якого приєднаний манометр, можна визначити за формулою:

$$P = P_a - C\varphi, \quad (10.4)$$

де $C\varphi$ – коефіцієнт пропорційності.

З формули (10.4) випливає, що для визначення абсолютного тиску трубчатим манометром необхідно одночасно вимірювати атмосферний тиск. Нижня межа вимірюваних тисків для цих манометрів звичайно складає кілька десятків міліметрів ртутного стовпа. Більш чутливі у порівнянні з трубчатими мембранні манометри. Тут як пружний елемент використовується плоска чи гофрована металева мембрана (рис. 10.5) [60], що при створенні перепаду тисків прогинається і через систему важелів надає рух стрілці-показчику.

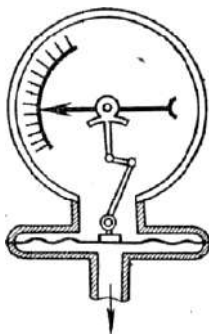


Рис. 10.5. Деформаційний мембранний манометр

Чутливість мембранного манометра можна підвищити, якщо використовувати мембранну коробочку (рис. 10.6). У такому приладі нижню межу вимірюваних тисків вдається понизити до 1 мм. рт. ст. [60]

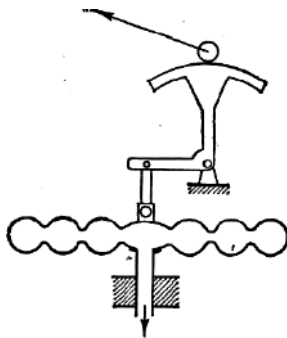


Рис. 10.6. Мембранний манометр коробчастого типу

Крім металевих, іноді застосовують більш чуттєві мембрани зі скла, кварцу і гуми, які дозволяють трохи розширити нижню межу вимірюваних тисків. На рис. 10.7[60] показаний манометр зі скляною мембранною

коробочкою, наповненою ртуттю, і припаяним до неї капіляром. Тиск у такому приладі визначають за зміною рівня ртутного стовпа у капілярі.

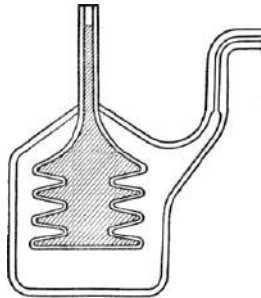


Рис. 10.7. Ртутний манометр з скляною мембраною – коробочкою

Абсолютні значення тиску мембранними приладами також визначають по формулі (10.4). Однак мембранними манометрами можна безпосередньо вимірювати абсолютний тиск, якщо з одного боку мембрани забезпечити постійне розрідження (порівняльний тиск) на рівні $p_0 \approx 10^{-4}$ мм рт. ст.

Тоді прогин мембрани визначається різницею тисків $p - p_0$ (де p – вимірюваний тиск), і показання такого приладу не будуть залежати від атмосферного тиску. Оскільки тиск p_0 набагато менше гранично вимірюваного p ($\sim 0,1$ мм рт. ст.), його можна не брати до уваги і шкалу показчика градувати на величини абсолютних тисків.

У нинішній час широко використовують як аналогові так і цифрові прилади вимірювання тиску, характеристики типових деформаційних

манометрів наведені у додатку 14[61–65], а зовнішні вигляди манометра нержавіючого ДМ-05–07 [62] та цифрового диференційного манометра GM 520[63] наведені на рис. 10.8 та 10.9 відповідно.



Рис. 10.8. Манометр нержавіючий ДМ-05–07 [62]



Рис. 10.9. Цифровий диференційний манометр GM 520[63]

Прилади для вимірювання тиску атмосферного повітря

Барометр-анероїд (грец. «анероїд» — «безводний»). Вони виробляються декількох конструкцій, компактні і зручні, використовуються як у приміщенні, так і стандартних метеорологічних радіозондах. Ними можна користуватися у польових умовах, на морських судах та літаках.

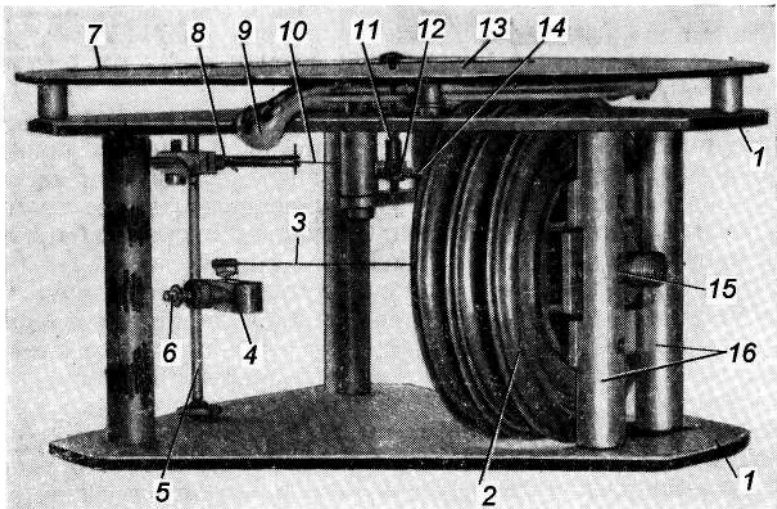


Рис. 10.10. Механізм барометра-анероїда БАММ: 1 — плата; 2 — бароблок; 3 — тяга; 4, 8 — плечі важеля; 5 — вісь; 6, 15 — регулювальні гвинти; 7 — стрілка; 9 — термометр; 10 — шарнірний ланцюг; 11 — вісь стрілки; 12 — ролик; 13 — шкальна плата; 14 — спіральна пружина; 15 — гвинт; 16 — стійки

Барометр-анероїд БАММ (барометр-анероїд Маклакова та Мануйлова) (рис. 10.10 та 10.11)[38–39] показує атмосферний тиск, що діє на гофровану тонкостінну металеву коробку (бароблок), у якій створене розрідження. При зниженні атмосферного тиску коробка злегка розширюється, а при підвищенні — стискується і впливає на прикріплену до неї пружину. На практиці часто використовується кілька (до десяти) бароблоків, з'єднаних послідовно. БАММ-1 забезпечує вимірювання атмосферного тиску в межах від 800 до 1060 гПа(600–800 мм рт.ст.).

Барографи-анероїди, що реєструють барометричний тиск, широко застосовують на всіх метеорологічних станціях.



Рис. 10.11. Барометр-анероїд БАММ

Характеристики серійних деформаційних барометр-анероїдів наведені у додатку 15[45].

Електричні мембранні манометри

За відхиленням мембрани можна стежити не тільки за допомогою стрілочних пристроїв. У чутливих мембранних манометрах для цього широко використовуються електричні методи. Один з них полягає у визначенні електричної ємності між мембраною і допоміжним нерухомим електродом, другий — у вимірюванні індуктивності нерухомої котушки, в яку входить залізний сердечник, зв'язаний з мембраною. Більш широко поширені прилади, у яких використовується так називаний нульовий метод вимірювання тиску, пов'язаний із застосуванням стабілізації положення мембрани. Сутність його полягає у тому, що прогин мембрани, отриманий у результаті

розрідження, компенсується механічним або електричним впливом, який приводить її у початкове положення. Таким чином, у цьому методі наявність у конструкції пружного елемента зводиться до функції індикатора рівності сил, що діють на нього по обидва боки, а величина компенсуючої сили є мірою вимірюваного тиску. Схематична будова камери компенсаційного мембранного манометра показана на рис. 10.12[60]. Чутливим елементом приладу служить металева діафрагма 3, розташована над ізольованим плоским електродом 4 яка відокремлює камеру 1 (вимірювальну) від камери 2 (порівняльної). Камера 1 з'єднана з об'ємом, тиск у якому необхідно виміряти, а у камері 2 підтримується досить низький порівняльний тиск p_0 .

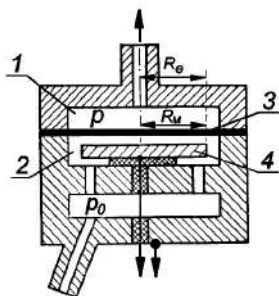


Рис. 10.12. Датчик мембранно-ємнісного манометра

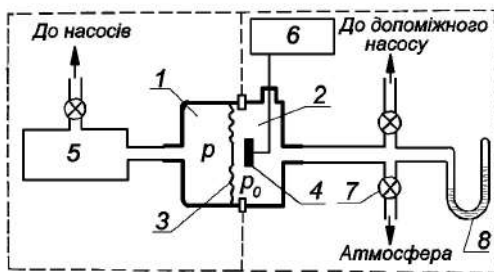


Рис. 10.13. Схема включення компенсаційного мембранного манометра

Під дією існуючої між камерами різниці тисків $\Delta p = p - p_0$ мембрана прогинається; сила F_p , яка діє на мембрану, визначається з рівності

$$F_p = \Delta p \pi R_m^2 \quad (10.5)$$

де R_m — ефективний радіус мембрани.

Силу F_p можна компенсувати механічно, зв'язавши порівняльну камеру 2 манометра з допоміжною вакуумною установкою, як показано на рис. 10.14[60], тиск у якому можна регулювати за допомогою натікача 7. Відсутність перепаду тисків у порівняльній і вимірювальній камерах манометра, оцінювана за вимірюванням ємності на проміжку мембрана — 3, нерухомий електрод — 4 ємнісним мостом 6 і дозволяє побічно виміряти тиск в відкачуємому об'ємі 1 рідинним манометром 8. Аналіз похибок вимірів мембранно-ємнісного манометра показує, що вони не перевищують 1,5% у діапазоні тисків від $5 \cdot 10^{-1}$ до 10^{-3} мм рт. ст. Верхня межа вимірюваних тисків за цим методом обмежується величиною пробивної напруги між обкладками

Компресійні манометри, як правило, заповнюють ртуттю, що виконує функцію поршня при стисканні газу. Перед початком вимірювання тиск в вакуумній системі та балоні 1 однаковий, бо рівень ртуті не перевищує відмітки А. Для вимірювання ртуть у манометрі необхідно підняти настільки, щоб вона стиснула газ і витиснула його у трубку 2. Тоді тиск стиснутого газу буде p_1 а рівень ртуті зупиниться на рівні В. У порівняльній трубці 3 тиск залишається незмінним, бо у ній ртуть піднімається до більш високого рівня С. Через те, що при стисканні кількість газу, перекритого на рівні А, і його температура залишаються практично постійними, що відповідно до закону Бойля — Маріотта

$$pV = p_1 V_1 \quad (10.6)$$

де p , V — вимірюваний тиск та початковий об'єм; p_1 , V_1 — тиск в трубці стиснення та кінцевий об'єм. Якщо p та p_1 виражені в міліметрах ртутного стовпа, а через h позначити різницю рівнів ртуті у трубках 2 та 3, то

$$p_1 = p + h \quad (10.7)$$

Тоді з формул (10.6) та (10.7) отримуємо

$$P = (p + h)V_1 / V, \quad (10.8)$$

а оскільки $p \ll h$, то вираз (7) спрощується до вигляду

$$P = h (V_1 / V) \quad (10.9)$$

Таким чином, вимірювання тиску компресійним манометром зводиться до такого зменшення первісного об'єму газу, щоб вимірюваний малий тиск p було збільшено до величини p_1 оцінюваної візуально за різницею рівнів h у вимірювальній і порівняльній трубках. Щоб уникнути можливої помилки через капілярну депресію вимірювальна і порівняльна трубки повинні мати однаковий діаметр. Як впливає з виразу (10.9), розширення нижньої межі вимірюваних тисків пов'язано зі зменшенням об'єму стискання V_1 , а це, у свою чергу вимагає використання вимірювальної трубки малого діаметра (звичайно порядку міліметра). У такому випадку вимірювальна трубка перетворюється у вимірювальний капіляр. Однак порівняльна трубка у вигляді капіляра має обмежену пропускну здатність, тому трубку, що зв'язує манометр із вакуумною системою, виготовляють досить великого діаметра, а порівняльну трубку — у вигляді відокремлення від неї.

Згідно з літературними даними впливає, що нижня межа тисків, вимірюваних компресійним манометром, визначається його геометричними

розмірами. Щоб підвищити чутливість манометра, треба зменшувати діаметр вимірювального капіляра і збільшувати об'єм V . Однак діаметр капіляра не може бути менше 0,8 мм через прилипання ртуті до скла, а об'єм скляного балона, через небезпеку його руйнування під дією маси ртуті, не повинен перевищувати 500 см^3 (що відповідає масі $\sim 7 \text{ кг}$). Якщо вважати, що найменший тиск після стискування (у вимірювальному капілярі) дорівнює 1 мм рт. ст., то нижня межа виміру компресійними манометрами лежить в області тисків $\sim 10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ З розглянутого вище видно, що компресійні манометри можуть бути цілком розраховані, тому їх використовують як еталонні прилади при градуюванні інших типів вакуумметрів. Перевагами є простота і легкість виготовлення, що зводиться в основному до складуваних робіт.

Однак компресійні манометри мають ряд істотних недоліків. Наявність у манометрі ртуті є джерелом забруднення як вакуумної системи, так і робочого приміщення. Заміна ртуті органічними оліями або іншими рідинами з низьким тиском пружності пари усуває цей недолік, але при цьому з'являються незручності, пов'язані, наприклад, з розчиненням газів і парів у робочій рідині і з необхідністю знегажування її перед вимірюванням, що дуже ускладнює конструкцію приладу. Тому незважаючи на те, що використання масляних компресійних манометрів дає збільшення чутливості більш ніж у 10 разів, вони не набули широкого поширення.

Компресійний манометр непридатний для безперервного контролю за зміною тиску, бо процес вимірювань вимагає проведення ряду маніпуляцій (піднімання й опускання ртуті), що займають порівняно великий час. Через сильне стискування газу (у 10^4 – 10^6 разів) компресійний манометр непридатний для вимірювань тиску газоподібних компонентів, які легко конденсуються (парів), що входять до складу атмосферного повітря (CO_2 , H_2O та ін.)[60].

У вимірювальній частині манометра тиск насичених парів ртуті завжди буде на рівні $\sim 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ Оскільки вплив такого тиску на вимірювану різницю рівнів практично не можна помітити, з цією похибкою можна не рахуватись. Щоб пари ртуті не проникали у відкачуємий об'єм, компресійний манометр слід приєднати до нього через охолоджувані вловлювачі.

Манометри, робота яких заснована на використанні законів кінетичної теорії газів

Термомолекулярні манометри

Принцип дії термомолекулярних манометрів (рис. 10.15) які називають також радіометричними або термометричними, заснований

на використанні термомолекулярних сил, що виникають між двома поверхнями, поміщеними у вакуум, і мають різні температури, T_1 і T_2 [60].

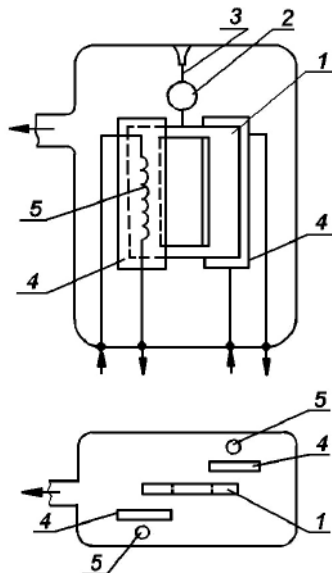


Рис. 10.15. Будова термомолекулярного манометра: 1 – легка рамка; 2 – дзеркальце; 3 – тонка нитка; 4 – непорушні пластинки; 5 – електричні нагрівачі

Цей ефект виявляється тоді, коли середня довжина вільного пробігу молекул перевищує відстань між поверхнями та кількісно виражається залежністю

$$f = (4/\pi) \cdot ((T_2 - T_1)/T_1) \cdot S, \quad (10.10)$$

з якої випливає, що при постійних температурах поверхонь існує лінійна залежність між термомолекулярними силами і тиском газу.

Область тисків, де виявляється термомолекулярний ефект визначається з одного боку, виконанням умови $\lambda > d$ (де λ — довжина вільного пробігу, d — відстань між пластинами), а з іншого боку — можливостями вимірювання малих сил, що діють на рухливу систему. У реальних конструкціях термомолекулярних манометрів верхня межа тисків зазвичай не перевищує 10^{-2} мм рт. ст., а нижній може бути розширений навіть в області надвисокого вакууму аж до 10^{-9} мм рт. ст. На рис. 10.16 показано схематичний устрій термомолекулярного манометра Кнудсена. Легка рамка 1 разом із дзеркальцем 2 підвішена на тонкій нитці 3. Проти бічних смужок рамки

по різні боки від неї розташовані нерухомі пластинки 4, що підігріваються до більш високої температури за допомогою електричних нагрівачів 5. Через різницю температур на підвищену систему діє крутний момент, який викликає її поворот на деякий кут. Цей кут, відрахований за допомогою світлового променя, відбитого від дзеркала 2, і слугує мірою тиску газу.

В'язкісні манометри

Робота в'язкісних або динамічних манометрів (рис. 10.16 та 10.17)[60] заснована на використанні залежності між в'язкістю і тиском газу. Ця залежність виявляється у тій області тисків, де середній вільний пробіг молекул газу є величиною того ж порядку, що і розміри судини, чи перевищує їх. Розрізняють наступні конструктивні різновиди в'язкісних манометрів: демпферні, вібраційні, і з обертовим диском.

У демпферних манометрах мірою тиску служить загасання коливань якого-небудь елемента, поміщеного у розріджений газ, тиск якого потрібно виміряти. У манометрі, зображеному на рис. 10.17, таким елементом є кварцова нитка товщиною в десяту частку міліметра. Щоб змусити нитку робити коливальний рух, до нижнього кінця її прикріплюють невеликий шматочок заліза і за допомогою магніту виводять з положення рівноваги. Внаслідок тертя об газ коливання нитки будуть загасаючими. При визначенні загасання звичайно вимірюють час t_n , протягом якого амплітуда коливань зменшиться до половини свого початкового значення. Для підвищеної нитки зв'язок між часом t_n і тиском визначається виразом:

$$t_a = a / (p\sqrt{M} + b), \quad (10.11)$$

де M — молекулярна маса газу; a , b — постійні, залежні від геометричних розмірів нитки та роду газу.



Рис. 10.16. Вібраційний манометр із коливною ниткою

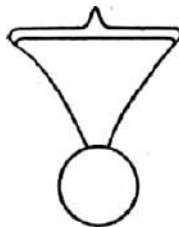


Рис. 10.17. Рухомий елемент вібраційного манометра з підвищеним затуханням.

Недоліком манометрів з однією ниткою є значна величина часу загасання.

Для прискорення згасання використовуються системи з двома нитками, до яких підвішена легка пластинка.

Область тисків, вимірюваних демпферними манометрами, лежить у межах від 10^{-1} до 10^{-5} мм рт. ст.

В іншому різновиді в'язкісних манометрів (рис. 10.18) алюмінієвий диск, що швидко обертається, створює завдяки в'язкості газу обертальний момент, який закручує рухливий легкий диск, підвішений на тонкій нитці. Диск закручується у більшому чи меншому ступені залежно від величини внутрішнього тертя. Мірою тиску в такому приладі служить кут закручування підвішеного диска, що виявляється пропорційним тиску[60]

$$\Phi = a p \omega \sqrt{M/R_0 T}, \quad (10.12)$$

де a — константа, що залежить від конструктивних особливостей манометра; p — тиск газу; ω — кутова швидкість обертання нижнього диска; M — молекулярна маса газу; R_0 — універсальна газова постійна; T — температура газу. Кут повороту φ_p відраховується по величині відхилення світлового променя, відбитого від дзеркала.

В'язкісні манометри з обертним диском дозволяють вимірювати тиск до 10^{-7} мм рт. ст. Однак завдяки високій чутливості до струсів і складної будови вони, як і термомолекулярні манометри, використовуються переважно у лабораторних умовах.

Гіпсометричний метод вимірювання тиску[38, 39]

Гіпсометричний метод визначення атмосферного тиску заснований на залежності температури кипіння рідини від тиску. Рідина починає кипіти при температурі, при якій пружність її парів дорівнює зовнішньому тиску на поверхню рідини. Як рідину при вимірюванні тиску гіпсотермометром використовують дистильовану воду. Знаючи температуру пари киплячої води, можна по спеціальних таблицях знайти пружність пари, а оскільки пружність пари дорівнює зовнішньому тиску, і, відповідно, атмосферний тиск. Таким чином, визначення атмосферного тиску за гіпсометричним методом зводиться до вимірювання температури пари киплячої води. Середня чутливість методу ($\Delta t / \Delta P$) близько $0,03$ °C/мбар.

Прилад, за допомогою якого роблять вимірювання тиску цим методом, називається **гіпсотермометром**. Він складається з гіпсотермометра і кип'ятильника з паровою камерою (рис. 10.18)[38, 39]. По конструкції

гіпсотермометр — це спеціальний високочутливий ртутний термометр(його шкала градуюється в одиницях тиску), який забезпечує вимірювання температури у точці $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ та від $83\text{ до }103\text{ }^{\circ}\text{C}$ з похибкою не більше $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ (відрахунки проводять за допомогою збільшувального скла). Точка $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ використовується при перевірці гіпсотермометра; шкала від $83\text{ до }103\text{ }^{\circ}\text{C}$ забезпечує визначення тиску від $450\text{ до }1120\text{ мбар}$ з похибкою $0,3\text{--}0,4\text{ мбар}$. Така висока точність відліку забезпечується високою чутливістю гіпсотермометра (завдяки великому об'єму резервуара і малій внутрішній площі перетину капіляра у робочій частині гіпсотермометра). Висока чутливість і великі межі шкали при відносно невеликій довжині гіпсотермометра (близько 300 мм) можливі завдяки наявності запасного об'єму (розширення у капілярі) на неробочій ділянці шкали гіпсотермометра, що відповідає температурному діапазону від $0,5\text{ до }83\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результати вимірювання гіпсотермометром залежать тільки від тиску. Маса гіпсотермометра і габарити значно менше, ніж у ртутних барометрів. Він легко транспортується і застосовується у складних умовах (в експедиціях, на кораблях та ін.).

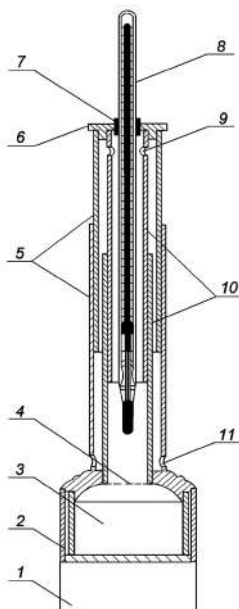


Рис. 10.18. Розріз кип'ятильника з гіпсотермометром: 1 — нагрівач; 2 — корпус; 3 — судина з водою; 4 — сітка; 5, 10 — трубки; 6 — кришка; 7 — уцілювальне кільце; 8 — гіпсотермометр; 9, 11 — отвори

Кип'ятильник гіпсотермометра (рис. 10.16)[38, 39] призначений для установки гіпсотермометра в парах киплячої води. Він складається з корпуса 2, у нижній частині якого розташований нагрівач (електронагрівальний елемент, спиртівка та ін.), а над ним судина 3 для дистильованої води. Над судиною знаходиться парова циліндрична камера з подвійними стінками з двох пар металевих, телескопічно з'єднаних трубок 5 і 10, і кришкою 6 з теплоізоляційного матеріалу. В отвір кришки через ущільнювальне кільце 7 уставляється гіпсотермометр 8. На судині в основі парової камери є сітка 4, що захищає гіпсотермометр від бризок киплячої води. Гіпсотермометр установлюється так, щоб стовпчик ртуті в його капілярі у момент відліку виступав над ущільнювальним кільцем 7 на 1–2 мм. Висоту парової камери регулюють, чи опускаючи чи піднімаючи її верхню частину. Пара киплячої води заповнює парову камеру, проходить через отвори 9 у верхній частині трубки 10, через зазор між трубками 5 до 10 і далі через отвори 11 виходить у навколишню атмосферу. Внутрішні стінки трубки 10 із двох боків стикаються з парою киплячої води, а тиск усередині парової камери дорівнює атмосферному, що забезпечує рівність температури у камері і температури пари киплячої води при цьому атмосферному тиску.

Манометри, робота яких основана на використанні теплопровідності газів

Одним з наслідків, що впливають з розгляду переносу енергії у газах, є незалежність теплопровідності від тиску. Однак в умовах достатньої розрідженості, коли середня довжина вільного пробігу молекул λ стає близькою до розмірів судини, теплопровідність газу виявляє залежність від тиску. При дуже низьких тисках, коли λ набагато перевищує розміри судини, відведення тепла від нагрітого тіла через газ стає знехтувально малим у порівнянні з тепловим випромінюванням і втратами тепла через металеві введення. На рис. 10.19[60] показаний хід кривих зміни теплопровідності газу Wt і температури нитки T для коаксіальної циліндричної системи, що складається зі скляної судини радіуса R і тонкої металевої нитки радіуса r , залежно від тиску газу.

З рис. 10.20 видно, що в області II, де $\lambda \geq R$ ефект зміни температури нитки, що нагрівається струмом постійної величини, може бути використаний для вимірювань вакууму. Такі прилади одержали назву **теплових манометрів**.

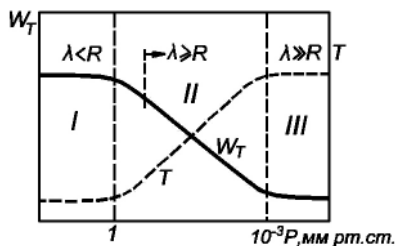


Рис. 10.19. Залежність теплопровідності газу і температури нитки від тиску

До найбільш розповсюджених різновидів теплових манометрів належать *манометри опору* або *Пірані* та термопарні, що розрізняються за методом реєстрації зміни температури нагрівального елемента.

Манометри опору (Пірані) були винайдені італійським вченим Марцело Пірані в 1906 р. (рис. 10.20 та 10.21)[60], як і всі інші прилади, в яких використовується залежність якого-небудь фізичного явища від тиску газу, складаються з датчика (манометричного перетворювача) і вимірювального блока. У цьому випадку датчиком служить лампа з ниткою розжарення, яка виготовлена з металу, що має великий температурний коефіцієнт опору, коли мала зміна температури нитки викликає помітну зміну її опору, а отже, і струму нагрівання. Тобто, зміна струму розжарення нитки може служити мірою тиску в датчику манометра.

Однак при такій схемі включення прилад буде мати низьку чутливість. Дійсно, скориставшись відомою залежністю опору металів від температури

$$R = R_0(1 + \beta t) \quad (10.13)$$

знайдемо, що для вольфраму $\beta = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ град}^{-1}$ в інтервалі температур 0–100 °C відносне збільшення опору при нагріванні на 5 °C не перевищує 2,5%. Оскільки струм у провіднику лінійно залежить від опору, його зміни також будуть невеликими, і тим самим приладом реєструвати їх практично неможливо. Крім того, на градування такого перетворювача буде впливати зміна температури навколишнього середовища. Щоб усунути ці недоліки, у сучасних манометрах опору зміни опору нагрівального елемента реєструються не за зміною струму розжарення, а з розбалансування моста Уїтстона (рис. 10.20), в одне з пліч якого включена манометрична лампа (опір R_1 , а в інше — зрівняльний опір R_2 (компенсатор). Останнє являє собою таку ж нитку розжарення, яка запаєна у колбу, відкачану до можливо низького тиску. Наявність зрівняльного опору автоматично компенсує всі впливи, що може робити на датчик зовнішнє середовище.

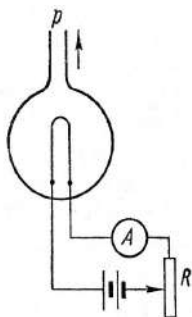


Рис. 10.20. Спрощена будова манометра опору

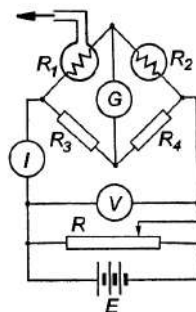


Рис. 10.21. Мостова схема включення датчика манометра опору

Розбалансування моста може бути визначено декількома методами:

1. Струм, що живить мостову схему (і нитка розжарення), підтримується постійними, і за гальванометром G оцінюється розбалансування моста як функція тиску.
2. Підтримуються постійними температура й опір нитки, а вимірюється напруга V джерела живлення у процесі відкачки.
3. Після приведення моста у рівновагу (при постійному струмі чи напрузі джерела живлення) розбалансування його оцінюється по градуйованих опорах R_3 і R_4 (на практиці цей метод застосовують рідко). Зазвичай манометри опору градують по компресійному манометру для сухого повітря. На рис. 10.22 показана типова градувальна крива манометру опору при постійному струмі розжарювання.

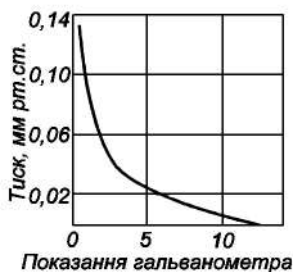


Рис. 10.22. Градувальна крива манометра опору при постійному струмі розжарювання

Звичайно манометрами опору вимірюють тиск в інтервалі $1,0-10^{-4}$ мм рт. ст., хоча сучасні схеми включення дозволяють розширити верхню межу до декількох десятків міліметрів ртутного стовпа. Це досягається в схемах з постійною (більш високою) робочою температурою нитки за рахунок використання перехідної ділянки кривої залежності теплопровідності від тиску (рис. 10.19). Однак з підвищенням тиску помітну роль починає відігравати відведення тепла механізмом конвекції газу. Тому градуйований датчик манометра опору повинен завжди знаходитися у визначеному положенні (звичайно вертикально, цоколем догори). Характеристики сучасного манометру опору (Пірані) фірми Edwards (Велика Британія) (рис. 10.23) наведені в додатку 16 [66].



Рис. 10.23. Комбінований датчик Пірані VSH89D [66]:
а — вид збоку; б — вид зверху.

Термопарні манометри

У *термопарних манометрах* зміна температури нагрітої нитки оцінюється за допомогою термопар. Вони також складаються з датчика (манометричної лампи), зв'язаного з об'ємом, в якому вимірюється тиск, та виносного вимірювального електричного блока, за допомогою якого встановлюється режим роботи датчика і вимірюється термоелектрорушійна сила термопар.

На рис. 10.24 [60] показано схематичну будову датчика і принципову електричну схему вимірювального блоку термопарного манометра.

Підігрівач 1 який виготовляють звичайно з платиного дроту, і зв'язана з ним за допомогою гарного теплового контакту термопара 2 запаюються у скляний чи металевий балон 3. Як матеріал для термопар найчастіше застосовуються наступні пари металів: платина — платинородий, хромель — алюмель, мідь — константан та ін.

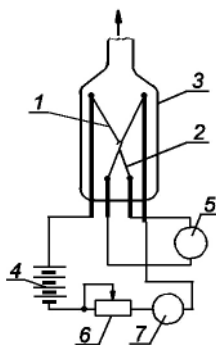


Рис. 10.24. Схема термопарного манометра: 1 – підігрівач; 2 – термопара; 3 – балон; 4 – джерело електричного струму; 5 – мілівольтметр; 6 – реостат; 7 – міліамперметр

Дія датчика заснована на реєстрації термопарою змін температури нитки (нагрівання електричним струмом від джерела 4), викликаних зміною тиску газу. Про зміну температури нитки судять за показниками мілівольтметра 5, що вимірює електрорушійну силу термопари. Термопарний манометр, як і манометр опору, необхідно градуювати, порівнюючи його показання з показаннями якого-небудь іншого абсолютного манометра, наприклад компресійного. Для цього вакуумна система або об'єм, до якого підключений датчик, відкачується до високого вакууму (зазвичай $\sim 10^{-4}$ мм рт.ст.) і реостатом 6 установлюється така величина робочого струму розжарення підігрівача 1, щоб е.р.с. термопари 2 була максимальною. При цьому втрати тепла підігрівником і термопарою через малу теплопровідність газу будуть обумовлені тільки тепловим випромінюванням і теплопровідністю ввідів. Отримана величина струму розжарення реєструється міліамперметром 7 і підтримується постійною як при знятті градуювальних розрахунків, у ході яких установлюється зв'язок між тиском і величиною т.е.р.с, так і у процесі подальших вимірів. Градуювання за показниками компресійного манометра необхідно робити із застосуванням виморожуючих пасток. Одним із прикладів термопарних манометрів є датчик ПМТ-2, відомий з другої половини 20-го століття (рис. 10.25). Враховуючи постійний попит на нього внаслідок застосування його для вимірювання вакууму приладами старих моделей ВТ-2, ВТ-3, ВИТ-1, ВИТ-2, ВИТ-3 та у сучасному приладі Мерадат-ВИТ-19ИТ1, він продовжує виготовлятися НПП Контакт (Росія) та іншими виробниками на теренах колишнього СРСР.

Його характеристики поруч з сучасним термопарним датчиком низького тиску — вакуметром Пірані *PVG-500/ PVG-500*(рис. 10.26), італійської фірми *Agilent Technologies* наведені в додатку 16[67–69].



Рис. 10.25. Датчик ПМТ-2[67]



Рис. 10.26. Вакуметр Пірані
PVG-500/ PVG-500[69]

Класифікація іонізаційних манометрів

В основі роботи іонізаційних манометрів лежить явище іонізації, тобто вибивання електрона з атома або молекули газу і перетворення їх у позитивно заряджений іон та електрон. Виниклі в об'ємі вільні заряди обумовлюють провідність газового проміжку або виникнення газового розряду. У першому випадку мірою ступеня розрідження служить величина струму позитивних іонів, у другому — величина розрядного струму.

Іонізаційні манометри розрізняються за способом одержання іонізуючих часток. Так, у магнітних електророзрядних манометрах часткова іонізація залишкового газу спричиняється вторинними електронами, вибитими з холодних катодів-відбивачів, у термоелектронних — електронами з розжарюваних катодів, а у радіоізотопних — джерелом радіоактивного випромінювання.

Термоелектронні іонізаційні манометри

У термоелектронних іонізаційних манометрах іонізація в об'ємі датчика відбувається внаслідок зіткнення електронів, що випромінюються катодом, який знаходиться під напругою, з атомами і молекулами залишкового газу. Найпростішим датчиком такого манометра може бути звичайна триелектродна система (радіолампа), балон якої з'єднаний з відкачуємим

об'ємом. На рис. 10.27 показана схема включення датчика термоелектронного іонізаційного манометра.

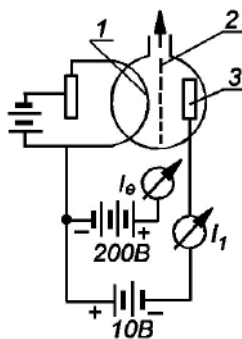


Рис. 10.27. Схема включення датчика термоелектронного іонізаційного манометра з позитивною сіткою: 1 – катод, 2 – заряджена сітка, 3 – колектор

Електрони, що вийшли з катода 1, під дією прискорюючого електричного поля спрямовуються до позитивно зарядженої сітки 2. Через близькість її розташування і великої прозорості значна частина електронів пролітає у простір сітки — колектор 3, де і відбувається іонізація газу.

При подальшому русі електрони гальмуються і, не дійшовши до колектора, що має невеликий негативний потенціал відносно катода, відбиваються від нього, а потім починають рух у зворотному напрямку. Деяка частина електронів уловлюється сіткою, а інші проходять крізь неї і попадають у гальмуюче поле простору сітки — катод. Якщо електрон на цьому шляху втратив частину своєї енергії на порушення або іонізацію молекул газу, він уже не досягне катода, а відіб'ється від нього і знову буде рухатися до сітки. Отже, частина електронів зможе зробити декілька коливань у просторі катод — колектор, перш ніж потрапить на сітку. Завдяки таким пролітним коливанням збільшуються шлях і час життя електронів, що вийшли з катода, і підвищується ймовірність іонізації в об'ємі датчика.

У рівноважному стані електронний струм у ланцюзі катод — сітка визначається емісійною здатністю катода і вторинних електронів, що утворилися при іонізації молекул залишкового газу. Оцінка струму вторинних електронів, що уловлюються сіткою при тисках $< 10^{-3}$ мм рт. ст., показує, що він знехтувально малий у порівнянні з емісією катода і з ним можна не рахуватись.

На рис. 10.28 [60] показаний градувальний графік датчика термоелектронного іонізаційного манометра ПМІ-2, що підтверджує лінійну залежність у великому інтервалі зміни тиску. Тому при градуванні досить одержати кілька точок в інтервалі $10^{-4} - 10^{-5}$ мм рт. ст. і потім екстраполювати пряму в область більш низьких тисків.

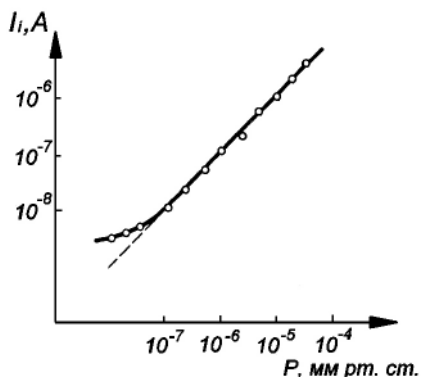


Рис. 10.28. Градувальний графік манометричного перетворювача ПМІ-2

Робоча область тисків, вимірюваних звичайними іонізаційними манометрами, простирається від 10^{-3} до $5 \cdot 10^{-8}$ мм рт. ст. Верхня межа обумовлена тим, що при тисках вище 10^{-3} мм рт. ст. помітно зменшується термін служби катода через його окислювання. Крім того, градувальна крива при більш високих тисках також відхиляється від прямолінійної. Це пояснюється тим, що середня відстань, на якій один електрон створює пари іон — електрон (ефективна довжина іонізації), стає порівнянною з довжиною пробігу електрона в просторі іонізації і вторинними струмами, створеними іонізацією газу, вже не можна зневажати у порівнянні з електронним струмом.

Для манометричного датчика ПМІ-2 (рис. 10.29 та 10.30) верхньою теоретичною межею є тиск $3,4 \cdot 10^{-2}$ мм рт.ст.

Однак для практичного використання цієї можливості вольфрамовий катод непридатний. Тому в перетворювачах типу ЛМ-3, розрахованих на вимірювання тиску від $1 \cdot 10^{-2}$ до $1 \cdot 10^{-7}$ мм рт.ст., використовуються катоди з іридієвим керном, покритим окисом ітрію. Такі катоди мають термін служби ~ 200 ч при тиску 1 мм рт. ст. При тиску $5 \cdot 10^{-8}$ мм рт.ст. істинний іонний струм колектора вже є порівняним з фоновим паразитним струмом, і тому рівень 10^{-7} мм рт. ст. є нижньою межею тисків для цих

датчиків. Характеристики іонізаційних манометрів ПМІ-2, виробництва НПП Контакт(Росія) та IGM401Hornet(рис. 10.31), фірми InstruTech Inc(США), наведені в додатку 16[70,71].

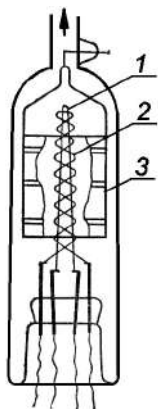


Рис. 10.29. Устрій манометричного перетворювача ПМІ-2: 1 – розжарюваний катод; 2 – сітка (анод); 3 – колектор іонів[60]

Рис. 10.30. Вид манометричного перетворювача ПМІ-2[70]

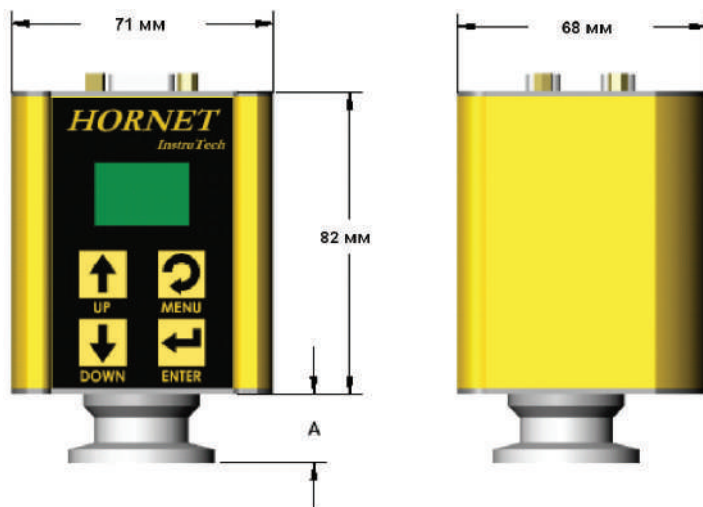


Рис. 10.31. Іонізаційний манометр IGM401Hornet[71]

Термоелектронний манометр орбітронного типу. У манометричному датчику термоелектронного манометра «орбітрон» підвищення чутливості досягається за рахунок значного збільшення шляху електронів у просторі іонізації датчика (рис. 10.32) без застосування магнітного поля.

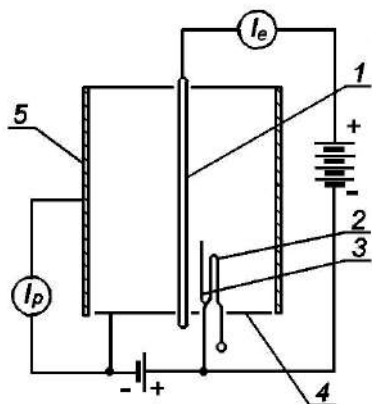


Рис. 10.32. Схема включення датчика орбітронного манометра: 1 – анод; 2 – розжарюваний катод; 3, 4 – електроди; 5 – колектор

Розжарюваний катод 2 разом з екрануючим електродом 3 розташований так, що в просторі анод 1 – колектор 5 порушена осьова і радіальна симетрія електричного поля. Завдяки цьому більшість емітованих катодом електронів має як осьову, так і тангенціальну складові швидкості. Тому їхній рух здійснюється по складних траєкторіях, поки вони не втратять свою енергію на іонізацію молекул газу й не потраплять на анод. Електрод 4, що має потенціал колектора, відіграє роль відбивача для електронів і запобігає їхній відхід із простору іонізації. У таких умовах ефективна довжина пробігу електрона може досягати декількох метрів, що викликає підвищення чутливості більш ніж у 10^4 разів у порівнянні з датчиком Байарда – Альперта. Однак щоб уникнути нагромадження об'ємного заряду електронів у просторі іонізації, що порушує нормальний режим роботи приладу, струм емісії в цьому перетворювачі повинний бути зменшений приблизно у 10^4 разів. У результаті постійна S такого манометра залишається такою ж, як і у звичайних термоелектронних іонізаційних манометрів. Тому для вимірювання в області низьких тисків необхідні підсилювачі постійного струму з великим коефіцієнтом підсилення. Нижня межа вимірювання орбітронними манометрами досягає рівня $\sim 10^{-14}$ мм рт.

ст., верхня $1 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. Характеристики іонізаційного манометра Varion XC з гарячим катодом та системою Байярда-Альперта німецької фірми VaCom наведені в додатку 16[72](рис. 10.33).



Рис. 10.33. Іонізаційний манометр Varion XC[72].

Контрольні запитання.

1. Назвіть шкідливі та небезпечні фактори при експлуатації вакуумних систем.
2. Наведіть одиниці вимірювання тиску та укажіть точність вимірів низького тиску у різних діапазонах.
3. Розглянути принцип дії механічних(деформаційних) манометрів, діапазон вимірювань, переваги та недоліки.
4. Розглянути принцип дії гідростатичних(рідинних) манометрів, діапазон вимірювань, переваги та недоліки.
5. Назвіть основні барометричні рідини для вимірювання високого та низького тиску.
6. Назвіть типи приладів для вимірювання атмосферного тиску та поясніть принцип їх дії.
7. Розглянути принцип дії компресійних та електричних мембранних манометрів, діапазон вимірювань, їх переваги та недоліки.
8. Розглянути принцип дії термопарних манометрів, діапазон вимірювань, їх переваги та недоліки.
9. Розглянути принцип дії іонізаційних манометрів, діапазон вимірювань, їх переваги та недоліки.

ТЕМА 7. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ВИРОБНИЧОГО ШУМУ, УЛЬТРА- ТА ІНФРАЗВУКУ.

Лекція 11.

Система контролю виробничого шуму, ультра- та інфразвуку.

ПЛАН

11.1. Вступ. Виробничий шум та його нормування.

11.2. Методи вимірювання шуму.

11.3. Прилади контролю виробничого шуму.

11.4. Ультра- та інфразвукові коливання, нормування та прилади вимірювання.

11.1. Вступ. Виробничий шум та його нормування

Понад 800 млн людей у всьому світі мають проблеми зі слухом. За деякими даними у 2015 р. кількість людей, що мають проблеми зі слухом, досягає 1,1 млрд (близько 16% населення). З них понад третина втратила слух через вплив надлишкового шуму на робочих місцях.

При контролі шумів необхідно, перш за все, їх виміряти. Контрольно-вимірювальна апаратура різноманітна, вона включає як ручні шумоміри, так й складні лабораторні системи для їх аналізу та обробки. Знання застосовуваних методів та обладнання є основним фактором, який дозволяє оцінювати шуми, утворені механізмами у виробничих умовах.

Мета вимірювань шуму

Основною метою вимірювань шуму, утворюваного механізмами, є визначення рівня шуму, що може привести до втрати слуху в окремих людей. Коли ж рівень шуму є недостатньо високим, щоб стати причиною ушкодження слуху, він може бути причиною неприємних відчуттів і перекручувань мови.

Дослідження шуму необхідно проводити для того, щоб визначити чи змінюються умови впливу акустичних навантажень внаслідок зміни роботи різної апаратури, устаткування і т.д. У більшості випадків недостатньо визначити рівень звукового тиску нового обладнання, тому що загальний рівень звуку ряду механізмів буде перевищувати припустимий рівень. З цієї причини вимірювання проводять для визначення акустичної потужності кожної окремої деталі устаткування.

Вимірювання необхідні для того, щоб дати оцінку джерелу і характеру шуму машини в цілому. Програма вимірювань є невід'ємною частиною будь-якої програми контролю шумів; при правильній розшифровці отриманих даних можна прийняти оптимальні рішення. Акустичне вимірювальне устаткування є основою при виконанні програми контролю шуму. Після проведення вимірювань отримані дані слід аналізувати. Для того щоб одержати правильні результати вимірювань, необхідно мати уявлення про тип вимірювального устаткування, про те, які вимірювання можна здійснювати з його допомогою, а також знати його недоліки.

Вимірювані величини

Флуктуація тиску, що поширюється в атмосфері у вигляді звукової хвилі, є однією з вимірюваних фізичних параметрів, вона приблизно дорівнює $14,35 \cdot 10^{-9}$ кг/м² для людини з нормальним слухом. Звуковий тиск — це слабка флуктуація вище або нижче тиску навколишнього середовища, в якій поширюється звукова хвиля. Звуковий тиск вимірюють у кг/м² або у Па (Н/м²); рівень звукового тиску визначають за такою формулою[73]:

$$L_p = 10 \lg (p_{\text{ск}}^2 / p_{\text{ст}}^2) = 10 \lg (p_{\text{ск}} / p_{\text{ст}})^2, \quad (11.1)$$

де $p_{\text{ск}}$ — середньоквадратичний тиск флуктуаційного звукового тиску, Н/м²; $p_{\text{ст}}$ — стандартне значення, з яким порівнюються всі інші значення тиску. Рівень звукового тиску є пропорційним десятичному логарифму відносного тиску. Тиск $p_{\text{ст}}$ називають стандартним звуковим тиском, який дорівнює 0,0002 дин/см² або 0,0002 мкбар.

Вимірювання звукового тиску, що змінюється у часі, представляє певні труднощі. Людське вухо не сприймає як звук статичний тиск, що повільно змінюється. Розглянемо змінювання статичного тиску при підйомі ліфта: при підйомі на 60,96 м вона складає 0,007 кг/см² ($6,9 \cdot 10^3$ Н/м²). Якщо цей тиск, що повільно змінюється, перетворити до рівня звукового тиску за формулою (11.1), то L_p — 170 дБ. Це значення значно більше загальноприйнятих рівнів звукового тиску, однак вухо не сприймає його як звук унаслідок дуже повільної зміни у часі. Флуктуація тиску повинна знаходитися в частотному діапазоні від 20 до 20 000 Гц, тоді його можна класифікувати як звук, який сприймають людським вухом. Діапазон динамічного тиску, що викликає інтерес при контролі шуму, складає від $14,35 \cdot 10^{-9}$ кг/м² ($2 \cdot 10^{-5}$ Н/м²), що приблизно дорівнює граничному рівню слуху людського вуха для звуку частотою 1000

Гц, до $143,53 \text{ кг/м}^2$ ($2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$), що відповідає звуковому тиску великих ракетних двигунів. Таким чином, приходить ся вимірювати динамічний тиск, що може змінюватися в дуже широкому діапазоні. З цієї причини використовують децибельну шкалу виміру для «стиску» діапазону величин.

Значення стандартного тиску $p_{\text{ст}}$ вибирають довільно, зазвичай

$p_{\text{ст}} = 14,35 \cdot 10^{-9} \text{ кг/м}^2$ ($2 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$), тоді 0 дБ відповідає порогу чутливості для звуку тоном 1000 Гц, тобто $\lg 1 = 0$, при чому $1 \text{ мкбар} = 1 \text{ дин/см}^2 = 7,078 \cdot 10^{-5} \text{ кг/м}^2$. Тому $P = 0,0002 \text{ мкбар}$, що складає $2 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м}^2$ або $2 \cdot 10^{-5} \text{ Па}$. Рівні звукового тиску наведені у табл. 11.1[73].

Таблиця 11.1. — Рівні звукового тиску[73].

Результат дії шуму	Lp, дБ	Звуковий тиск (середньоквадратичний)			Шум або умови його виникнення
		Н/м ² (Па)	атм	кг/м ²	
Фізичне ушкодження	200	$2 \cdot 10^5$	2,03	143,53	183м від ракети при старті.
	180	$2 \cdot 10^4$	$2,03 \cdot 10^{-1}$	14,35	Викликає миттєву глухоту.
	160	$2 \cdot 10^3$	$2,03 \cdot 10^{-2}$	$14,35 \cdot 10^{-1}$	Відповідає порогу фізичного ушкодження тканини слухового апарату.
	140	$2 \cdot 10^2$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$14,35 \cdot 10^{-2}$	Зліт реактивного літака, больовий поріг.
Ушкодження слуху, больові відчуття	120	$2 \cdot 10$	$2,03 \cdot 10^{-4}$	$14,35 \cdot 10^{-3}$	Грім, гарматний постріл, кувальний молот, кривошипний прес.
	100	2	$2,03 \cdot 10^{-5}$	$14,35 \cdot 10^{-4}$	Виробництво з верстатами великої потужності (фрезерувальні).
	80	$2 \cdot 10^{-1}$	$2,03 \cdot 10^{-6}$	$14,35 \cdot 10^{-5}$	Виробництво з верстатами середньої потужності (свердлувальні).
	60	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,03 \cdot 10^{-7}$	$14,35 \cdot 10^{-6}$	Виробництво з верстатами малої потужності.
Подразнення	40	$2 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-8}$	$14,35 \cdot 10^{-7}$	Розмова у будинку середньої густини заселення.
	20	$2 \cdot 10^{-4}$	$2,03 \cdot 10^{-9}$	$14,35 \cdot 10^{-8}$	Шепіт; листя, що ледь шурхотить на вітру.
	0	$2 \cdot 10^{-5}$	$2,03 \cdot 10^{-10}$	$14,35 \cdot 10^{-9}$	Відповідає межі чутності.

Лінійна шкала частот (100, 200, 300 Гц і т.д.) часто непридатна для звукових частот у діапазоні від 20 до 20 000 Гц. Варто використовувати звичайний метод поділу цього діапазону на десять нерівних інтервалів, що називаються «октавними смугами». По суті октава відповідає подвоєнню

частоти, наприклад, 63, 125, 250 Гц і т.д. Для зручності при лабораторному вимірюванні звуку деякі середні частоти розташовують у межах діапазону чутного звуку від низького до високого і розділяють їх за октавним принципом.

Є безпосередній зв'язок між рівнем гучності, часом впливу і швидкістю пошкодження слуху. Безпечним часом перебування у робочій зоні, де рівень шуму становить 80 дБ, є 8 год. Збільшення шуму на кожні 3 дБ подвоює його руйнівну силу. Тобто зростання шуму на кожні 3 дБ наполовину скорочує час, протягом якого може бути завдано шкоди слуху. Наприклад, якщо працівник дістав пошкодження органів слуху після 8-годинного впливу звуку гучністю 85 дБ, то збільшення рівня гучності всього на 3 дБ — завдасть такої ж шкоди всього за 4 год; 91 дБ — за 2 год; 100 дБ — 15 хв відповідно. Після досягнення рівня больового порогу 130–140 дБ такої ж шкоди слуху буде нанесено менше ніж за 1 с.

Гігієнічна регламентація шумів ґрунтується на критерії збереження здоров'я та працездатності людини. Гранично допустимі рівні шуму на виробництві повинні забезпечувати функціонування фізіологічних систем організму в межах адаптаційних можливостей на весь час трудової діяльності.

Нормування шуму здійснюється згідно з ДСН 3.3.6.037-99[74]. При цьому використовуються два методи:

- 1) нормування рівня звукового тиску L , дБ, за граничним спектром шуму (октавними смугами);
- 2) нормування рівня звуку L_A , дБА (еквівалентний рівень шуму).

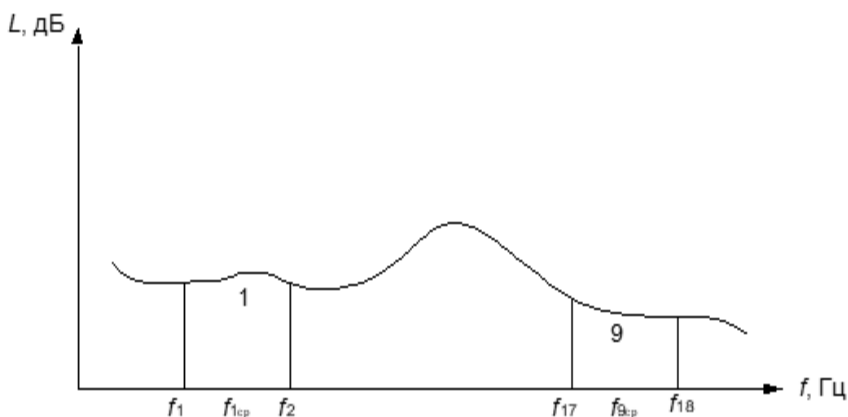


Рис. 11.1. Спектр шуму з зазначеними октавними смугами[2]

За першим методом нормування шуму здійснюється у діапазоні частот від 22,5 до 11520 Гц. Це пов'язано з тим, що, по-перше, звуки з частотами нижче 22,5 Гц та вище 11 520 Гц здатні чути менше 1% людей, а по-друге, звуки частотами більше 10 000 Гц рідко зустрічаються в промислових умовах. Весь зазначений діапазон поділяється на 9 октавних смуг (рис. 11.1), для яких справедливі вирази:

$$(f_i + 1) / f_i = 2; \quad (11.1)$$

$$f_{\text{сеп}} = \sqrt{(f_i + f_{i+1})} = f_i \cdot \sqrt{2}. \quad (11.2)$$

Середні значення частот октавних смуг створюють стандартний ряд: 31,5; 63; 125; 250; 500; 1 000; 2 000; 4 000; 8 000 Гц.

Термін «октава» (звідси — «октавна смуга») прийшло до акустики з музики, де було помічено, що якість звуку повторюється при подвоєнні частоти.

Шум на робочих місцях не повинен перевищувати допустимих рівнів, значення яких наведені у [74]. Сукупність дев'яти допустимих рівнів звукового тиску має назву «граничний спектр» (ГС). Граничні спектри являють собою спрощені криві однакової гучності. Характеристикою, а одночасно й позначенням граничного спектра є рівень звукового тиску в октавній смузі з середньою частотою 1 000 Гц. Фактичні значення рівня звукового тиску оцінюють за допомогою шкали «С» шумоміру з використанням фільтрів, які пропускають шуми однієї конкретної октавної смуги.

Нормування рівня звуку застосовується для орієнтовної оцінки шуму на робочому місці. У цьому разі допускається за характеристику стійкого шуму на робочому місці приймати рівень звуку L_A у дБА, що вимірюється за шкалою «А» шумоміра, частотна характеристика якої імітує криву чутності вуха людини. Рівень звуку пов'язаний з граничним спектром (ГС) залежністю[2]:

$$L_A = \text{ГС} + 5. \quad (11.3)$$

11.2. Методи вимірювання шуму

Система вимірювань

Результати контролю шуму залежать від способу вимірювання. Необхідно розуміти, що процес вимірювання впливає на значення цієї

величини. При акустичних вимірюваннях існують три елементи вимірювальної системи, що впливають безпосередньо на отримані дані (рис. 11.2) [73].



Рис. 11.2. Схема вимірювальної системи

Для того щоб дослідити визначене джерело шуму, необхідно зрозуміти взаємозв'язок середовища, в якому проводяться вимірювання, акустичного перетворювача й електронної вимірювальної апаратури.

Середовище вимірювань

Простір, в якому розташоване досліджуване обладнання, робить визначений вплив на вимірюване акустичне поле. Акустична енергія поширюється у вигляді хвиль стискування. При наявності міцних перешкод ці хвилі відбиваються назад до джерела шуму. У цьому випадку акустичні вимірювання можуть бути помилковими, тому що акустичне поле буде являти собою сукупність прямих і відбитих хвиль. Тому будують спеціальні лабораторні приміщення, в яких усувають відбиття. У деяких випадках відбиті хвилі враховують при проведенні вимірювань. Отже, при лабораторних акустичних вимірах необхідно знати характеристики застосовуваних оточуючих середовищ (не ревербераційна камера; ревербераційна камера; напівзвукопоглинальна камера, відкрите повітря).

Неревербераційна камера. Вона являє собою приміщення, де відсутнє відлуння, підлога, стіни і стеля якого виготовлені зі звукопоглинального матеріалу. Вся звукова енергія, випромінювана деталями машин, поширюється у радіальних напрямках та поглинається стінами. У зв'язку з тим, що відбиття є відсутнім, не виникає ніяких інтерференційних картин, що могли б вплинути на точність вимірювань. Вільний від відбиття простір подібного типу необхідний при визначенні характеристик спрямованості звуку, що випромінюються від об'єктів. В якості прикладу розглянемо діаграму спрямованості випромінювання (рис. 11.3) [73].

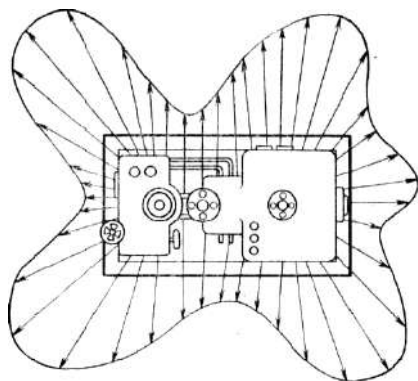


Рис. 11.3. Діаграма випромінювання звуку машини (отримана у вільному полі для заданої частотної складової звуку)

Необхідно відмітити, що діаграма спрямованості відтворює одну частотну складову з повного спектра шумів. Роблячи вимірювання в різних точках, можна отримати діаграму, подібну зображеній на рис. 11.3, периметр якої являє собою контур однакового рівня звукового тиску. Деякі припущення можна зробити про те, де виникає ця окрема складова шуму. Вочевидь, вона розташовується симетрично щодо машини. Діаграми спрямованості подібного типу можна одержати у деяких безвідлунних оточуючих просторах. Таке устаткування використовують також, коли необхідно зробити вузькосмуговий частотний аналіз. У такому випадку для акустичного дослідження застосовують безвідлунне приміщення, де відтворюються дані, які не можуть бути отримані в звичайних акустичних приміщеннях. Як правило, вдається одержати діаграми спрямованості випромінювання звуку, дані вузькосмугового частотного аналізу, фазові співвідношення акустичної енергії від різних місць розташування джерела.

Ревербераційна камера. Принцип дії пристроїв подібного типу протилежний принципу дії безвідлунної камери. Теоретично у ревер-бераційному приміщенні вся акустична енергія відбивається назад до джерела від стін, виготовлених з відбиваючого матеріалу. У результаті багаторазових відбиттів спостерігається майже рівномірний розподіл звукової енергії у приміщенні. Іноді встановлюють великі вентилятори для забезпечення рівномірного розподілу звукової енергії. Рекомендується також використовувати мікрофон на візку, що рухається, для того, щоб робити вимірювання середнього звукового рівня у межах деякого просторового розподілу.

Мета застосування ревербераційної камери полягає у тому, щоб одержати усереднені за часом дані просторових вимірювань загальної акустичної енергії, випромінюваною якою-небудь деталлю машини. У такому приміщенні створюється стандартне навколишнє середовище, що дозволяє порівняти шуми від різних деталей. За допомогою устаткування подібного типу можна оцінити акустичну потужність. Дані для всіх джерел усереднюються, тому не враховується спрямованість і точне положення різних джерел звуку.

Місце розташування джерела шуму в приміщенні може вплинути на результат вимірювання загальної випромінюваної акустичної потужності. На практиці джерело поміщають в одному куті приміщення не ближче, ніж на $1/2$ довжини хвилі від стін чи підлоги.

Довжину хвилі (у метрах) розраховують за формулою, м[73]:

$$\lambda = 344 / f, \quad (11.4)$$

де f — частота, Гц.

Зазвичай найнижча частота дорівнює 100 Гц, і, вочевидь, довжина хвилі дорівнює 3,44 м, якщо джерело шуму знаходиться не ближче, ніж на 1,7 м. Обладнання, яке у процесі експлуатації розташовується на жорсткій підлозі, можна установити на підлозі ревербераційного приміщення.

Напівзвукопоглинальна камера

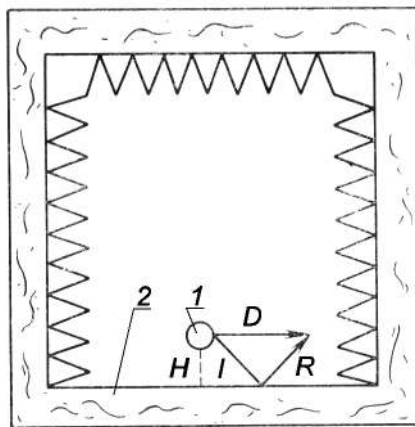


Рис. 11.4. Напівзвукопоглинальна камера: стіни та стеля облицьовані звукопоглинаючими клинами, підлога бетонна: 1 — джерело; 2 — відбиваюча поверхня підлоги; I — падаюча хвиля; R — відбита хвиля; D — невідбита хвиля; H — висота над підлогою[73]

Часто недоцільно будувати звукопоглинальну камеру, для акустичних випробувань великогабаритного важкого обладнання. Для таких досліджень використовують напівзвукопоглинальне приміщення. Підлогу зазвичай виготовляють з бетону, а стіни і стелю покривають звуковбирним матеріалом, як показано на рис. 11.4. Варто вживати спеціальних заходів при створенні навколишнього середовища подібного типу. Навіть, якщо шум від джерела не має визначеної спрямованості звукове поле може мати спрямованість унаслідок відображень від підлоги. Можливе зменшення звукового тиску, коли довжина шляху невідбитого і відбитого звуку відрізняється на $1/2$ довжини хвилі. У цьому випадку (рис. 11.4)

$$1 + R - D = n\lambda / 2, \quad (11.5)$$

де $1 + R$ — довжина шляху відбитого звуку; D — довжина шляху невідбитого звуку; λ — довжина хвилі; $n = 1, 2, 3 \dots$

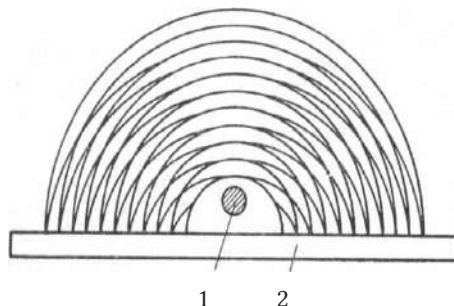


Рис. 11.5. Інтерференційна картина падаючих та відбитих акустичних хвиль джерела, розміщеного над відбиваючою поверхнею: 1 — джерело; 2 — відбиваюча площина.

Схематично інтерференційна картина показана на рис. 11.5[73]. Посилення звукового тиску відбувається в областях, де серії ліній перетинаються, а ослаблення звукового тиску відбувається в областях, де відстань між лініями залишається приблизно рівною. Звукове поле буде являти собою накладення невідображених і відбитих хвиль. Поблизу відбиваючої площини тиск поля завжди збільшується і вимірювання показують рівень на 3 дБ вище. Ефект ослаблення — збільшення тиску також залежить від відстані від підлоги до джерела x і довжини хвилі звуку λ .

Можна сформулювати такі основні положення:

- 1) поблизу відбиваючої площини рівень звукового тиску на 3 дБ вище, ніж рівень невідбитого звукового тиску;

- 2) якщо довжина хвилі більше в 10 разів відстані між джерелом і відбиваючою площиною ($x/\lambda < 0,1$), то внаслідок відбиття не спостерігається значної спрямованості (це має місце при частотах нижче 1 000 Гц);
- 3) для середніх частот ($x/\lambda = 0,2-1,0$) спостерігається явно виражена спрямованість;
- 4) для високочастотного випадкового звуку (без чистих тонів) випромінюєме поле майже однорідне за винятком області поблизу відбиваючої поверхні.

Розташування джерел шуму щодо площини, що відбиває, впливає на випромінювану акустичну потужність. Це відбувається у результаті того, що хвилі відбиваються у зворотному напрямку до джерела зі здвигом по фазі. Залежно від відстані x — джерела від відбиваючих площин можливі такі зміни вихідної потужності:

- 1) якщо джерело знаходиться поблизу відбиваючої площини ($x < 0,1\lambda$), вихідна потужність джерела подвоюється і стає більше 3 дБ;
- 2) коли джерело знаходиться на відстані $1/4-1/2$ довжини хвилі від відбиваючої площини ($x = 1/4\lambda \div 1/2\lambda$), його вихідна потужність зменшується приблизно на 1 дБ;
- 3) якщо відстань від джерела до відбиваючої площини, більше, ніж довжина хвилі ($x > \lambda$), спостерігається незначний його вплив на випромінювану акустичну потужність.

Вимірювання, проведені поза приміщеннями. Іноді вимірювання акустичних шумів машин роблять поза камерою на відкритому повітрі, наприклад на місці, відведеному для стоянки автомобілів. Характеристики зовнішнього середовища у цьому випадку подібні характеристикам напівзвукопоглинальної камери, якщо дотримуються такі умови:

- 1) випробувальна ділянка вільна від великих відбиваючих поверхонь, наприклад будинків або інших висот у межах 30,5 м від досліджуваної машини або мікрофона;
- 2) коефіцієнт поглинання звуку відбиваючої поверхні не більше 0,2;
- 3) рівні шумового фону, принаймні, на 10 дБ нижче вимірюваного рівня шуму;
- 4) рівень шуму вітру на 10 дБ нижче вимірюваного рівня шуму; для зменшення впливу вітру на мікрофон можна використовувати спеціальні захисні кришки, проте при зачиненій кришці різниця у вимірюваннях може досягати 10 дБ;
- 5) не рекомендується робити вимірювання рівню шуму біля поверхні землі.

Умови вимірювань промислових шумів

Відповідно до існуючих стандартів потрібно проводити вимірювання шуму в реальних умовах, тобто там, де знаходяться машина і людина. Описане раніше спеціальне устаткування призначене для лабораторного аналізу шуму, що вимагає точних вимірювань і детального дослідження акустичних характеристик джерела. При вимірюванні промислових шумів спостерігається багато небажаних факторів, наприклад, досить високий рівень шумового фону, відбиваючі поверхні, шум від різних джерел. Кожен із цих факторів впливає на точність вимірюваного рівня звукового тиску L_p . Звичайно, викликає інтерес визначення рівня звукового тиску на робочому місці. Інколи для того, щоб забезпечити точність вимірювань, необхідні відповідні заходи безпеки.

Розміщені поруч відбиваючі поверхні. Біля відбиваючих поверхонь: підлога, стіни, перегородки, приміщення, машини і механізми та ін., рівень звукового тиску буде вище внаслідок того, що він подвоюється, тобто L_p збільшується на 3 дБ біля поверхні у порівнянні з L_p на робочому місці, розташованому на деякій відстані від поверхні.

Флуктуація рівня звуку. У виробничих умовах рівень звуку непостійний і змінюється у часі, що звичайно реєструється шумоміром. Відомо, що рівень звукового тиску є величина, яка відповідає сумі квадратів відношення середньоквадратичного тиску. Рівень середнього звукового тиску в децибелах не є середньою величиною показань приладу.

На практиці роблять усереднення відхилень вимірювального приладу. Якщо сумарне відхилення складає 6 дБ або менше, то середнє значення двох показань у децибелах є приблизно середнім результатом показань. При відхиленні більше 6 дБ за середнє значення беруть величину на 3 дБ менше, ніж найбільша величина, показана вимірювальним приладом.

Це правило обумовлене характером додавання логарифмічних величин. Перемикачі «швидко» і «повільно» на звичайному шумомірі призначені для зведення до мінімуму впливу флуктуації рівня шуму. Два види переключення на шумомірі визначають часову характеристику приладу; перемикач «повільно» забезпечує більш тривалу за часом середню характеристику, знижуючи тим самим вплив флуктуації показань стрілки приладу при швидко мінливих рівнях тиску. Відповідно до стандарту повільне вимірювання потрібно для сталого (не імпульсного) звукового тиску. При більшості інших умов перемикач приладу повинен знаходитися у положенні «повільно» для того, щоб одержати деяке усереднення сигналу за часом, хоча при цьому положенні перемикача можливе існування флуктуації вимірів.

Фон. Іноді неможливо припинити роботу агрегату або припинити роботу на виробничих ділянках для того, щоб виміряти рівень звуку однієї машини. Вимірювання слід робити не у робочий час, а під час перерв. Фон варто визначати на певній ділянці, виключаючи, якщо можливо, використовувану машину і роблячи вимірювання рівня звукового тиску. При включенні машини знову вимірювання потрібно проводити на тій же ділянці. За допомогою графіка на рис. 11.6[73] можна визначити рівень шуму, створюваного машиною, при визначеному фоні.

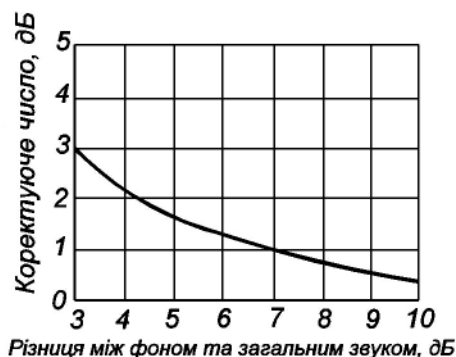


Рис. 11.6. Коректувальний графік рівня звукового тиску L_p з урахуванням рівня фону (коригувальне число віднімається з виміряних рівнів звукового тиску октавної смуги)

Якщо фон на 10 дБ нижче рівня звукового тиску працюючої випробуваної машини, то його, як правило можна не брати до уваги. Бажано, щоб фон був на 10 дБ нижче, ніж акустичний сигнал (тоді ним можна знехтувати). Розглянемо випадок, коли машина працює на виробничій ділянці з високим рівнем шуму і для вимірювання рівня звукового тиску використовують портативні октавно-смугові аналізатори. Встановлено, що в октавній смузі 1000 Гц рівень шуму машини у виробничих умовах складає

92 дБ. При виключеній машині цей рівень дорівнює 85 дБ. Таким чином, різниця у показаннях складає 7 дБ. За рис. 11.6 визначаємо, що із загального показання (92 дБ) необхідно відняти 1 дБ для того, щоб одержати рівень шуму машини, тобто 91 дБ. Всі отримані значення потрібно округляти до найближчого цілого числа децибелів. Якщо різниця складає 10 дБ чи більше, то корекцію робити не треба. Цей метод звичайно використовують для визначення середньої частоти октавної смуги.

Повітряний потік. У деяких випадках повітряний потік виникає від охолоджуючих вентиляторів, при роботі повітродувки і т.д. Мікрофон реагує на тиск повітряного потоку. При проведенні вимірювань мікрофон повинен знаходитися поза зоною дії повітряних потоків. У випадку використання вентиляційних пристроїв поблизу робочих місць мікрофони застосовують з вітровими захисними екранами. Інформацію про використання вітрових екранів для окремих мікрофонів слід одержувати у постачальника вимірювальної апаратури. При використанні екранів вводять поправкові коефіцієнти.

Вплив оператора. Звук може відбиватися від операторів так само, як і від стін та машин. При вимірюваннях оператори повинні знаходитися на достатній відстані від мікрофона. На рівні звуку можуть також впливати особи, що реєструють показання шумоміра. Похибка ± 5 дБ може виникнути у результаті того, що оператор тримає вимірювальний прилад занадто близько до себе. На практиці рекомендується використовувати ручні шумоміри з приставкою для того, щоб виключити вплив рук і тіла оператора на роботу мікрофона. Для підвищення точності вимірювань рекомендується також поміщати мікрофон на штатив з подовженим кабелем для того, щоб оператор знаходився на відстані більше ніж 3 м від мікрофона.

Вимоги, які застосовують до вимірювань. Перш, ніж приступити до проведення акустичних вимірювань, потрібно знати, які дані необхідно одержати. Ретельне попереднє планування вимірювань шумів є основою одержання корисної інформації. Акустика й контроль шумів ще не вивчені і не розроблені до такого ступеня, коли за допомогою послідовної методики проведення стандартних вимірювань можна зробити повний аналіз. Кожен випадок контролю шумів являє собою особливу задачу, що вимагає ретельного вивчення. В акустиці легко записати спектри шумів, але досить важко розшифрувати дані вимірювань. Значно легше одержати велику кількість даних, ніж зробити їхній аналіз. При контролі шумів оператор відіграє не останню роль, бо обирає методику роботи й аналізує отримані дані. Інженер, що бере участь у проведенні акустичних вимірювань, повинен знати, з якою метою проводяться вимірювання шумів, яке устаткування використовувати, де повинен бути розташований мікрофон, які режими, які інші дані, що мають відношення до вимірювань, необхідно знати (наприклад, швидкості, зусилля, тиск, передаточні відношення та ін.).

Мета проведення вимірювань

Це основне питання необхідно було б розглядати перед тим, як робити вимірювання, тому що відповідь на нього значною мірою визначить вибір вимірювальної апаратури. Вимірювання шумів у більшості випадків проводять з тієї причини, що сильний шум, утворений машиною, дратує робітників. У результаті вимірювань визначають рівень небажаного шуму і місце, де необхідно збільшити товщину звукопоглинального матеріалу. Рішення більшості проблем, пов'язаних з контролем шумів, майже ніколи не буває простим. Необхідно відзначити, що майже всі вимірювання шумів починаються після того, як хто-небудь суб'єктивно оцінить шум як голосний. Наступний етап повинен привести до зниження цього шуму. Розглянемо такі етапи роботи:

А. Нормування шумів.

Б. Випробовування машини.

В. Прикладні дослідження.

Конкретні аспекти цих питань будуть розглянуті окремо.

А. Нормування шумів. Якщо метою є визначення фактора, що заважає, при роботі машини, то вимірюють тільки рівень шуму. Рівень шуму, скоректований за характеристикою А, несе у собі інформацію, що необхідна для визначення розташування деталі, яка створює шум, у машині. При цьому вимірювання варто проводити там, де буде знаходитися оператор. Для вимірювань використовують шумомір з коригувальною характеристикою А. Сьогодні більшість норм на шум передбачає тільки вимірювання його значення; однак у майбутньому може знадобитися інформація і про його частоту. Сучасні світові, у тому числі й українські, промислові стандарти вимагають, щоб рівні шумів виражалися в октавних чи в 1/3-октавних смугах.

Є зв'язок між рівнем гучності, часом впливу і швидкості пошкодження слуху. Безпечним часом перебування у робочій зоні, де рівень шуму становить 80 дБ становить 8 год. Збільшення шуму на кожні 3 дБ подвоює його руйнівну силу. Критерій для визначення втрати слуху під дією шуму зв'язаний з інтегрованим у часі рівнем шуму. Існують електронні прилади, що визначають вплив шуму, що змінюється у часі шляхом інтегрування його рівня. У результаті визначають дозу експозиції відповідно до стандартів. Один з таких приладів — інтегратор дози шуму.

Б. Випробування машини. Даними, які необхідно одержати при випробуваннях, є рівень шуму і частота. Мета — порівняти один прилад з яким-небудь іншим стандартним приладом і на підставі цього вибрати вимірювальну

апаратуру. Іноді не потрібний аналіз повного частотного спектра, а необхідно досліджувати тільки ті частоти, що вважаються характерними для конкретної машини. Метод дослідження можна удосконалити. У ряді випадків можна визначити дефекти за спектром шумів. Середовище вимірювань і місце розташування мікрофона слід вибирати таким чином, щоб могла бути виміряна викликаюча зацікавленість конкретна частотна складова. При цьому вимірювальну апаратуру необхідно вибирати для кожного окремого випадку. Звичайно використовують 1/3-октавні й октавні аналізатори.

В. Прикладні дослідження. Мета цих досліджень — зниження рівня шумів і одержання значно більшої кількості інформації. Даними, що характеризують джерело шуму, є рівень шуму, частотний діапазон, спрямованість, фазові співвідношення складових і швидкість наростання шуму. Звичайно ці дані одержують в акустичній лабораторії. Для одержання даних про рівень шуму і частотний діапазон зазвичай використовують вузькосмуговий аналізатор, а для визначення характеристик спрямованості джерела шуму по можливості застосовують безвідлунну камеру. Вимірювання можна проводити й у виробничих умовах при відповідній підготовці. Інформацію про фазові співвідношення частотних складових часто використовують для визначення точного місця розташування конкретного джерела і напрямку поширення шуму. Для одержання даних про фазові співвідношення використовують фазометри, корелятори і спеціальні аналізатори. При вирішенні ряду проблем важливо знати швидкість наростання конкретного шуму. Для цього необхідно одержати інформацію при несталому режимі роботи устаткування щодо конкретної частотної складової спектра шуму. Часто через звукопоглинання конструкції, змін температури, механізмів зворотного зв'язку та інше конкретна частотна складова шуму повільно змінюється (збільшується чи зменшується) залежно від характеристик машини. Контроль шумів може засвідчити підвищення інтенсивності шуму. Вибір вимірювальної апаратури для прикладних досліджень залежить від поставленої задачі і від інформації, яка повинна бути отримана. Вимоги, які висувають до апаратури, змінюються залежно від складності задачі і конкретних лабораторних умов.

Розташування мікрофона.

Визначивши мету вимірювання шумів, слід розглянути деякі фактори, що впливають на вимірювання. Одним з найважливіших факторів є розташування мікрофона відносно джерела шумів і предметів навколишнього середовища. Знання акустичного поля, що оточує джерело, дозволяє визначити місце розташування мікрофона при проведенні вимірювань.

А. Ближнє і далеке поля. Мікрофон являє собою прилад, чуттєвий до тиску. Він повинен – реагувати на флуктуації акустичного тиску і тиск потоку рідини чи газу. Коливання тиску виникають, наприклад, у турбулентному повітряному потоці вентилятора. Існує думка, що рух відбувається в звуковій області коливань, проте вони не поширюються як звукові на великій відстані.

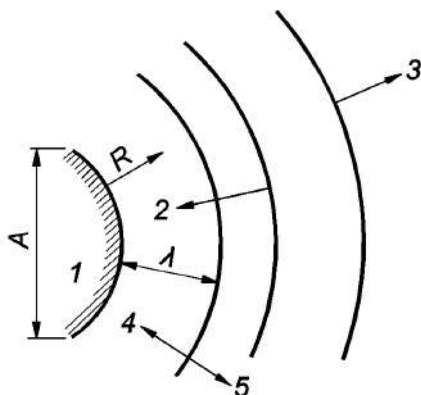


Рис. 11.7. Области акустичного поля чи джерела шуму: 1 – джерело; 2 – геометрично ближнє поле; 3 – геометрично далеке поле; 4 – акустично ближнє поле; 5 – акустичне поле[73]

Можна зробити висновок: якщо необхідно виміряти шум вентилятора, то мікрофон не слід поміщати в області його турбулентного повітряного потоку. Очевидна ж умова, якої необхідно дотримуватись при вимірюванні шуму двигуна, мікрофон не слід ставити поблизу забірників повітря і вихлопу газів. За цих умов мікрофон слід розташовувати поруч з потоком.

Ближнє акустичне поле являє собою звукове поле поблизу джерела звуку, наприклад, поблизу вібруючого джерела. Воно характеризує потік повітря, що рухається, утворений вібруючою поверхнею. У результаті цього руху повітря виникають коливання тиску, що не поширюються як звук. Ця область показана на рис. 11.7 поблизу поверхні вібруючого джерела. Щоб не вимірювати коливання гідродинамічного тиску, на практиці мікрофон звичайно поміщають, принаймні, на відстані не менше однієї довжини хвилі найнижчої частоти складових шуму джерела. Довжина звукової хвилі (у метрах) при кімнатній температурі розраховується за формулою (11.4), причому, якщо найнижча частота, що представляє інтерес, дорівнює 100 Гц, то відповідно до цього правила мікрофон варто помістити на відстані не ближче ніж 3,44 м.

Область, відсунуту від джерела на відстань більш однієї довжини хвилі, називають **далеким акустичним полем**.

Інша область, показана на рис. 11.7, являє собою **геометричне ближнє поле**, що характеризується тим, що флуктуації тиску в цій області є акустичними і форма джерела визначає спрямованість звукового поля. Іншими словами, розміри джерела A можна порівняти з відстанню від нього. Акустичне поле залежить від форми джерела.

Геометричне далеке поле характеризується тим, що розміри джерела не впливають на вимірювання в цій області. Очевидно, що всі джерела однакової потужності і спрямованості ідентичні в цій області. Ця область починається на відстані, яка у 3–4 рази перевищує найбільший розмір джерела A . У зв'язку з тим, що акустичне ближнє поле залежить від дійсних розмірів джерела A та заданої довжини хвилі λ , воно може поширюватися за межі геометрично ближнього поля.

Не слід робити виміри в акустичному ближньому полі, якщо потрібно записати справжні величини звукового тиску. Однак якщо оператор знаходиться в цій області, то виміри необхідно проводити на його робочому місці. У межах геометричного ближнього поля розташування мікрофона залежить від того, які дані необхідно одержати. Інформація, одержувана в геометричному далекому полі, показує, яким чином акустична хвиля буде поширюватися на значній відстані від джерела.

Б. Реверберуюче поле. У будинку з відбиваючими поверхнями, просторовий розподіл звукового поля може створювати стоячі хвилі. Звукове поле подібного типу характеризується рівнями звукового тиску, що є функцією місця розташування мікрофона всередині приміщення. Ця умова є результатом суперпозиції звукових хвиль, відбитих від стін чи камери приміщення. Рівень звуковий тиску відтворює вихідний сигнал мікрофона при переміщенні його в просторі.

В. Вільне поле. У вільному полі, коли відбиті і стоячі хвилі незначні, мікрофон необхідно поміщати в місцях, характерних для вимірюваної складової звуку.

Основними методами вимірювання шумових характеристик є такі:

а) для рівнів звукової потужності:

- 1) точний метод для вимірювань у вільному звуковому полі в заглушеній камері зі звукопоглинальною або відбиваючою звук підлогою;
- 2) точні прямий метод та метод порівняння (з використанням зразкового джерела шуму) для вимірювання у ревебраційному полі в ревебраційній камері;

- 3) точний метод для вимірювань скануванням у виробничих приміщеннях на відкритих площадках за інтенсивністю звуку;
- 4) технічний метод у суттєво вільному звуковому полі над відбиваючою звук площиною для вимірів у виробничих приміщеннях, на відкритих площадках та у заглушених камерах з відбиваючою звук підлогою;
- 5) технічний метод порівняння (з використанням зразкового джерела шуму) для вимірювань у ревербераційному (гулкому) приміщенні (для малих переносних машин);
- 6) технічний метод порівняння (з використанням зразкового джерела шуму) для вимірювань у спеціальній ревербераційній камері (для малих переносних машин);
- 7) технічний або орієнтовний метод порівняння (з використанням зразкового джерела шуму) у суттєво ревербераційному полі для вимірювань у виробничих приміщеннях на місці встановлення машини (в умовах експлуатації);
- 8) технічний метод для вимірювання у виробничих приміщеннях та на відкритих площадках за інтенсивністю звуку — у дискретних точках за
- 9) або скануванням;
- 10) орієнтовний метод для вимірювань у виробничих приміщеннях або на відкритих площадках;
- б) для рівнів звукового тиску випромінення у контрольних точках поблизу машини:
 - 1) технічний метод для вимірювань у суттєво вільному звуковому полі над відбиваючою звук площиною;
 - 2) технічний або орієнтовний метод для вимірювань у виробничих приміщеннях та відкритих площадках на місці встановлення машини (в умовах експлуатації);
 - 3) орієнтовний метод для вимірювань на місці встановлення машини (в умовах експлуатації);
 - 4) метод визначення рівнів звукового тиску випромінення за рівнем звукової потужності.

Спираючись на ці методи можуть бути розроблені стандарти на методи випробувань на шум видів машин. При цьому допускається відхід від основних методів у частині вибору розмірів вимірювальних поверхонь, кількості та положення точок вимірювань, режимів роботи, встановлення машини, тривалості вимірів та інше, якщо попередніми

дослідженнями доведено, що результати відповідно до стандарту на методи досліджень шуму не відрізняються від отриманих основним методом більше ніж на значення, встановлені стандартом на відповідний основний метод.

Розглянемо кілька методів вимірювання шумових характеристик більш детально.

Вимірювання у ревербераційній камері. Вимірювання шуму машин можна проводити в ревербераційній камері, що являє собою приміщення, у якого стеля і підлога не рівнобіжні один одному і добре відбивають звук. В ідеалі, оскільки звук від джерела багаторазово відбивається у всіх напрямках між добре відбиваючими поверхнями приміщення, ці багаторазові відображення повинні утворити цілком дифузійне звукове, тобто звукове поле, що володіє рівною щільністю у всіх точках. Однак у дійсності цілком дифузійне поле не існує. Переваги використання ревербераційних камер: будівництво обходиться значно дешевше, ніж будівництво заглушених камер; ревербераційна камера придатна для роботи методом зразкового джерела шуму; при цьому визначають наближене значення рівня звукової потужності шляхом порівняння рівнів звукового тиску випробовуваного джерела і зразкового джерела шуму, для якого відомий рівень звукової потужності.

Головні недоліки вимірювань у ревербераційній камері полягають у тому, що цим методом не можна визначити спрямованість джерела шуму, він дає менш точні результати вимірювань рівня звукової потужності, особливо для джерел шуму, що мають домінуючі чисті тональні складові. Причини похибок будуть розглянуті нижче.

Завдяки відображенням, поблизу кожної обмежуючої стіни в ревербераційній камері утвориться інтерференційна картина. Припустимо, що хвилі звукового тиску довжиною λ одиничної амплітуди падають на стіну з усіх напрямків. Тоді можна показати, що середній квадрат звукового тиску поблизу стіни визначається виразом[73]

$$P_x^2 = 1 + \sin(4\pi x / \lambda) / (4\pi x / \lambda), \quad (11.6)$$

де x — відстань від стіни, м; λ — довжина звукової хвилі, м.

З формули видно, що середній квадрат звукового тиску подвоюється на поверхні стіни і при віддаленні від неї спадає. Крива спаду коливається зі зменшуваною амплітудою. Поблизу кута між двома стінами і між трьома стінами коливання кривої спаду звукового тиску більш значні.

Оскільки багато машин випромінюють одну чи кілька домінуючих тонально чистих складових шуму, що приводять до утворення складних

інтерференційних карт ревербераційної камери, звукова потужність, що віддається машиною в цю камеру, не така ж сама, що і у випадку вільного звукового поля. Щоб звести до мінімуму вплив інтерференції на звуковий тиск і звукову потужність, рекомендується, щоб усі частини випробуваної машини були на відстані не менше 1,5 м від стін камери. Усі положення мікрофона чи будь-який маршрут його переміщення не повинні лежати в якій-небудь площині, що складає з поверхнями камери кут менше 10° . Жодне з положень мікрофона і жодна точка маршруту його переміщення не повинні знаходитися ближче ніж $\lambda / 2$ від поверхні камери, де λ — довжина хвилі на найнижчій частоті діапазону, який досліджують. Об'єм джерела шуму переважно не повинен перевищувати 1% ревербераційної камери.

11.3. Прилади контролю виробничого шуму

У попередньому розділі розглянуті різні методи вимірювання шуму. Частина з них закріплена у нормативному документі ДСТУ ГОСТ 23941:2004[75] і є стандартними. Всі інші застосовують для розв'язання спеціальних задач у ході наукових досліджень. Загальноприйнята назва приладів, які призначені для вимірювання шумів — шумоміри. Ці прилади складаються з датчика (мікрофони), підсилювача, частотних фільтрів (аналізатора частоти), реєструючого приладу (самописця або магнітофону) та індикатора, який показує рівень вимірюваної величини у дБ. Шумоміри споряджені блоками частотної корекції з перемикачами A , B , C , D та часових характеристик з перемикачами F (fast) — швидко, S (slow) — повільно, I (pik) — імпульс. Шкалу F застосовують при вимірах постійних шумів, S — коливальних та перервних, I — імпульсних. Фактично шумомір являє собою мікрофон, до якого підключений вольтметр, відградуйований у децибелах. Оскільки електричний сигнал на виході з мікрофона пропорційний вихідному звуковому сигналу, приріст рівня звукового тиску, що впливає на мембрану мікрофона, викликає відповідний приріст напруги електричного струму на вході у вольтметр, що і відображається за допомогою індикаторного пристрою, відградуйованого у децибелах. Для вимірювання рівнів звукового тиску в контрольованих смугах частот, наприклад 31,5; 63; 125 Гц і т.п., а також для вимірювання рівнів звуку (дБ), корегованих за шкалою A з обліком особливостей сприйняття людським вухом звуків різних частот, сигнал після виходу з мікрофона, але до входу у вольтметр пропускають через відповідні електричні фільтри. Існують шумоміри чотирьох класів точності (0, 1, 2 і 3). Клас «0» — це зразкові засоби вимірювань; клас 1 — застосовується для лабораторних і натурних

вимірювань; 2 клас — для технічних вимірювань; 3 клас — для орієнтовних вимірювань. У кожного класу приладів є відповідний частотний: шумоміри класів 0 і 1 розраховані на частоти від 20 Гц до 18 кГц; класу 2 — від 20 Гц до 8 кГц; класу 3 — від 31,5 Гц до 8 кГц.

На сьогодні в Україні на час видання книги для регламентації вимірювань виробничих шумів діють стандарти, що походять від документів радянських часів, до аббревіатури яких додано ДСТУ, прикладом такого документа є ДСТУ ГОСТ 23941:2004. У Російській Федерації до 2008 року діяв радянський ГОСТ 17187–81. У 2008 р. цей документ було гармонізовано з європейським стандартом МЕК 61672–1 (IEC 61672–1), результатом чого став новий ГОСТ Р 53188.1–2008. У США зараз застосовуються стандарти ANSI (зокрема ANSI S1.4), що істотно відрізняються від європейських.

Одним із часто застосовуваних на виробництві є прилад ВШ-2000 (рис. 11.8)[76].



Рис. 11.8. Шумомір ВШ-2000.

Він належить до шумомірів І класу і призначений для вимірювання шуму у виробничих приміщеннях і житлових кварталах з метою охорони здоров'я; при розробці і контролі якості виробів; при дослідженнях і випробуваннях машин і механізмів.

Крім того, існує цілий ряд приладів, що почали виготовляти у 70–80 роки 20-го століття на підприємствах колишнього СРСР та НДР (Східна Німеччина), які і зараз ще виготовляють невеликими серіями та використовують для

вимірювання рівнів звукового тиску в октавних смугах частот, для вимірювань рівнів шуму та для вимірювання еквівалентного рівня звуку. При цьому слід зазначити, що технічні характеристики сучасних модифікацій деяких з цих приладів дещо відрізняються від тих, що випускались у 80-х роках 20-го століття(додаток 17[77–80]). Одним з таких приладів є точний імпульсний шумомір RTF 00 024(рис. 11.9).



Рис. 11.9. Точний імпульсний шумомір RTF 00 024

Крім цих приладів, звичайно, існує ціла низка більш сучасних приладів, скорочені характеристики декількох з них яких наведені у додатку 18[76, 81–87], а один з них, шумомір Wintact WT-85, наведений на рис. 11.10.



Рис. 11.10. Шумомір Wintact WT-85[82]

11.4. Ультра- та інфразвукові коливання, нормування та прилади їх вимірювання

Інфразвук. За своєю природою інфразвукові коливання лежать нижче 16 Гц, причому однією з їх особливостей є велика довжина. Поглинання навколишнім середовищем досить мале і становить лише від 10^{-5} до 10^{-8} дБ/км залежно від частоти коливань. Зі збільшенням довжини хвилі у них сильніше виявляється здатність до проникнення у приміщення та обминання перешкод. Дослідженнями було встановлено, що інфразвук частотою 7 Гц є смертельним для людини.

Інфразвукові коливання можуть виникати у природних умовах (під часу шторму на морі їх частота може лежати в межах 6–7 Гц) та у виробничих процесах: при роботі систем вентиляції та кондиціювання (80–90 дБ), при роботі двигунів внутрішнього згоряння (до 132 дБ), компресорів (90–115 дБ), вібростолів та віброплощадок (110–120 дБ) та іншого обладнання.

За часовими характеристиками інфразвук поділяють на **постійний**, рівень звукового тиску якого за шкалою «лінійна» на характеристиці «повільно» змінюється не більше, ніж на 10 дБ за одну хвилину спостереження та **непостійний** рівень звукового тиску якого за шкалою «лінійна» на характеристиці «повільно» змінюється більше ніж на 10 дБ за одну хвилину спостереження.

На робочих місцях параметром **постійного** інфразвуку, що нормуються, є рівень звукового тиску в октавних смугах частот із середньо-геометричними частотами 2; 4; 8; 16 Гц у децибелах, який згідно з [74] дорівнює для всіх згаданих вище частот 105 дБ.



Рис. 11.11. Шумомір Октава 110 А [87]

Для **непостійного** інфразвуку параметром, що нормується, є загальний еквівалентний рівень звукового тиску за шкалою «лінійна» шумоміра у дБ лін., який дорівнює 100 дБ лін.[74]. Для вимірювання інфразвуку зараз

використовуються шумоміри, у яких розширено частотний інтервал вимірювання нижче 16 Гц, прикладами таких приладів є «Октава 101А»(рис. 11.11), «Октава 110 А», характеристики яких наведені у додатку 18.

Ультразвук. Прийнято вважати, що частота ультразвуку є вищою за $2 \cdot 10^4$ Гц, проте враховуючи той факт, що переважна більшість людей не сприймає як звук коливання вище 11 520 Гц, ці коливання за спектром поділяють на **низькочастотні**, які передаються людині повітряним і контактним шляхом (від $1,2 \cdot 10^4$ до 10^5 Гц) та **високочастотні** (від 10^5 до 10^9 Гц). Ультразвукові хвилі поширюються у будь-якому середовищі, тому вони за способом поширення бувають повітряні (через повітря) та контактні (передається на руки працюючої людини через тверде чи рідке середовище).

У промисловості ультразвук використовують у ливарних цехах для обробки рідких розплавів, очистки відливок, у системах очищення газів; для зварювання пластмас, контролю якості зварних з'єднань та інших процесах.

Нормованими параметрами ультразвуку, утворюваного коливаннями повітряного середовища у робочій зоні, є рівні звукового тиску L_p (дБ) у третинооктавних смугах із середньгеометричними частотами 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 50; 63; 80; 100 кГц.

Нормованим параметром ультразвуку, який передається контактним шляхом, є пікове значення віброшвидкості у частотному діапазоні від 0,1 до 10^3 МГц або його логарифмічний рівень у дБ. Відповідно до [74] допустимий рівень ультразвукового тиску у третинооктавних смугах із середньгеометричними частотами 12,5; 16; 20; 25; 31,5–100 кГц на робочих місцях від ультразвукових установок наведено у табл. 11.2[74].

Таблиця 11.2. — Допустимий рівень ультразвукового тиску в третинооктавних смугах на робочому місці

Середньгеометричні частоти третинооктавних смуг, кГц	12,5	16	20	25	31,5–100
Допустимі рівні тиску, дБ	80	90	100	105	110

Допустимий рівень ультразвукових тисків в октавних смугах із середньгеометричними частотами 16; 31,5; 63 та вище подано у табл. 11.3.

Таблиця 11.3. Допустимий рівень ультразвукових тисків в октавних смугах на робочих місцях[74].

Середньгеометричні частоти третинооктавних смуг, кГц	16	31,5	63 та вище
Допустимі рівні тиску, дБ	88	106	110

Для вимірювання ультразвуку зараз використовуються шумоміри, у яких розширено частотний інтервал вимірювання вище 12 кГц, прикладами таких приладів є «АСИСТЕНТ SIU 30»[88](рис. 11.12), «АСИСТЕНТ SIU V1»[89], «Экофизика 110А» у виконанні HF (комплекти 110АВ-4, ЭКОАкустика – Компакт, «Экофизика 110А» у виконанні 110А(комплекти 110А – Basic, 110А – Basic В1, ЭКОАкустика-110А, ЭКОАкустика-АВ1, ЭКОАкустика-АВ3[90]. Особливістю цих приладів є те, що вони вимірюють також шум, інфразвук, вібрацію та інше, технічні характеристики деяких з них наведені у додатку 18[88, 89, 91].



Рис. 11.12. Шумомір АСИСТЕНТ SIU 30

Контрольні запитання.

1. Що таке шум? Укажіть методи його нормування та в чому полягає принцип дії приладів для його вимірювання?
2. Наведіть одиниці вимірювання звукового тиску та їх співвідношення.
3. Які ви знаєте основні оточуючі середовища при дослідженні шуму?
4. Укажіть особливості вимірювання рівнів шуму в ревербераційній камері.
5. Укажіть особливості вимірювання шуму у напівзвукопоглинальній камері, та на відкритому повітрі.
6. Укажіть особливості вимірювання рівнів шуму в нереревербераційній камері.
7. Поясніть особливості розташування мікрофона в акустично ближньому, далекому та ревербераційному полі.

8. Які ви знаєте основні методи вимірювання шумових характеристик для рівнів звукової потужності?
9. Які ви знаєте основні методи вимірювання шумових характеристик для рівнів звукового тиску випромінення у контрольних точках поблизу машини.
10. Які частини звукового спектра отримали назву ультра- та інфразвук?
11. При яких природних та виробничих процесах утворюються ультра- та інфразвукові коливання?
12. Яким чином нормується ультра- та інфразвук?

ТЕМА 8. СИСТЕМА КОНТРОЛЮ ВИРОБНИЧОЇ ВІБРАЦІЇ

Лекція 12. Система контролю виробничої вібрації

ПЛАН.

12.1. Вібрація. Класифікація вібрації.

12.2. Нормування вібрації.

12.3. Методики та прилади, які використовують для вимірювання вібрації.

12.1. Вібрація. Класифікація вібрації

Що ж таке вібрація? Це процес механічних коливань. Причому термін «вібрація» належить тільки до зазначених вище процесів. Проте не будь-які механічні коливання прийнято називати вібрацією.

Щоправда поняття «вібрація» поки не одержало точного наукового визначення. Однак можна вказати на деякі ознаки, що виділяють вібрацію в класі механічних коливань.

З поняттям «вібрація» ми звичайно зв'язуємо відносно малі відхилення окремих точок тіла. Наприклад, вібрує фундамент, корпус літака, сидіння в автомобілі, підшипник, вібрує міжповерхове перекриття будинку. Але не можна, наприклад, сказати, що хитання маятника, які, безумовно, належать до механічних коливань, — це теж вібрація. На фізичний маятник, який робить коливання вправо — вліво, може одночасно діяти і вібрація, якщо його точка підвісу знаходиться на вібруючій стіні, від якої передається вібрація, або якщо він досить гнучкий і робить вібрацію (чи вібрує) як пружне тіло. Але цей процес особливий, він не зв'язаний із процесом хитання маятника. Не можна назвати вібрацією коливальний рух поверхні води у водоймі[92].

Таким чином, однією з ознак вібрації є відносно малі відхилення тіла чи його точок при механічних коливаннях (передбачаються малі відхилення відносно характерних розмірів тіла).

Інша ознака вібрації — частота, тобто число циклів вперед–назад, виконаних тілом чи його окремими точками в одиницю часу. Звичайно вібрація відбувається з більшою частотою, ніж коливання. Наприклад, коливання судна при хитахавиці мають великі відхилення при малій частоті, а вібрація обшивання корпусу — малі відхилення при великій частоті. Однак частота

при малих відхиленнях не завжди характерна для вібрації. Наприклад, говорять «низькочастотна вібрація» (зокрема, відносно до пружної підвіски автомобіля).

Нарешті, є ще одна ознака вібрації, що належить до фізичної характеристики вібруючого об'єкта і до природи походження процесу.

По-перше, вібрації піддаються **пружні тіла** — стрижні, мембрани, пластини, оболонки й ін., тобто вібрація — це «малі» коливання пружних тел. Вібрує під фундаментом ґрунт, що володіє пружними властивостями; вібрують опори ліній електропередачі, що являють собою металеві конструкції з пружними властивостями; вібрують пружні труби, по яких тече рідина, і т.д.

По-друге, вібрації піддаються тіла, що знаходяться у полі перемінних електромагнітних сил, на основі чого побудовані багато електродинамічних збудників вібрації. Вібрують також частки сипучих тіл у штучно створеному полі змінних сил тертя на вібруючій платформі, вібрують корпуси електричних генераторів, трансформаторів під дією змінних електромагнітних сил.

Таким чином, **вібрація — це малі механічні коливання, що виникають у пружних тілах або тілах, які знаходяться під дією змінного фізичного поля**[92].

На практиці (на машинобудівних заводах та в організаціях, які експлуатують машини) вібрацією називають як саме явище, так і величину найбільшого відхилення якої-небудь характерної точки деталі машини при вібрації.

За способом передачі коливань на людину вібрація підрозділяється на загальну і локальну. Загальна — передача коливань через опорні поверхні тіла сидячої або стоячої людини. Локальна — передача здійснюється через руки людини.

Загальна вібрація залежно від джерел її виникнення підрозділяється на такі категорії:

- 1) **транспортна** вібрація. Виникає така вібрація у результаті руху машин по місцевості і дорогам;
- 2) **транспортно-технологічна** вібрація. Виникає вібрація при роботі машин, що виконують технологічні операції у стаціонарному положенні і (або) при переміщенні по спеціально підготовленій частині виробничого приміщення (крани, екскаватори і т.п.).
- 3) **технологічна** вібрація. Виникає при роботі стаціонарних машин, або передається на робочі місця, що не мають джерел вібрації (стіни, вентилятори, хімічні установки і т.п.).

Можна стверджувати, що у всіх машинах без винятку виникають механічні коливання. Навіть при вільному польоті космічного корабля відчувається вібрація від працюючої апаратури. Характерне для нашої епохи збільшення швидкодії і потужності техніки призвело до різкого підвищення рівня вібрації.

Величезна практика вивчення коливань і вібрації (як у природі, так і у техніці) показала різнобічний характер їхньої дії. У техніці вібрація пружних елементів машин і механізмів може вплинути на точність їхньої роботи та спотворити задуманий конструктором рух. Вібрація здатна робити руйнування. Під дією потоків рідини відбувається вібрація трубок теплообмінників атомних реакторів, а це може привести до серйозних поломок. Під дією потоку повітря вібрує крило літака, що може призвести до його руйнування. При експлуатації машин нерідко спостерігаються втомні поломки — вони походять від вібрації при виникненні великих знакозмінних напружень у матеріалі, що призводять зрештою до руйнування.

Втомні поломки неодноразово призводили до серйозних аварій. Від вібрації верстатів, розташованих в одному приміщенні, з'являються тріщини у будинку, а, крім того, вібрація створює шум, що шкідливо впливає на робітників, які обслуговують верстати. Так, у Бангладеш (передмістя Дакки — столиці цієї країни, провінція Савар) на підприємстві з пошиття одягу відбулася найбільша техногенна катастрофа на початку 21 ст., в якій загинуло 1 129 осіб. Причиною її стали сильні вібрації від чотирьох потужних генераторів, які співпали з вібрацією тисяч швацьких машин[93]. Вібрація ручних відбійних молотків викликає так звану вібраційну хворобу, причому найбільш шкідливим для людини є одночасний вплив вібрації, шуму та низької температури. Надзвичайно підступною ця хвороба є для жінок через ризик втрати репродуктивної функції. Особливо небезпечні для людини коливання з частотою 4–8 Гц, що збігаються з власною частотою коливань ряду внутрішніх органів, які пружно закріплені на скелеті (серце, печінка, нирки та ін.), і близько 30 Гц (частота власних коливань тіла людини). Вібрація транспортних засобів (автомобілів, літаків) шкідливо діє на пасажирів і водіїв.

Так, у ФРН та Англії проведені багаторічні медичні обстеження операторів, які працюють на тракторах, та робітників інших професій, що були піддані дії вібрацій[94]. Встановлено, що ймовірність деформації хребта у трактористів становить 72% у віці 20–29 років. Для порівняння наведемо ймовірність деформації хребта для інших професій: водії автобусів — 45% у віці 30–39 років, будівельні робітники — 38% у віці 50–59 років,

сільськогосподарські робітники — 44% у віці 40–49 років, землероби — 55% у віці 40–49 років, шахтарі — 72% у віці 50–59 років. При клінічних обстеженнях 330 водіїв 14% поскаржились на болі під грудьми; 36,8% — на болі в попереку. У 20% всіх обстежених осіб діагностовано хронічний попереково-крижовий радикуліт, у 41,7% — дегенеративні зміни хребта, у 12,7% хронічний гастрит, у 8% — виразкова хвороба шлунку і дванадцятипалої кишки. Пригнічення функцій вестибулярного аналізатора, нервові захворювання, порушення функцій серцево-судинної системи також є результатом тривалого впливу коливань. Окремі частини людського тіла мають резонансні частоти у діапазоні 1...27 Гц. Цим багато у чому пояснюється шкідливість коливань.

В останні роки в зв'язку з розвитком реактивних двигунів в авіації була виявлена «акустична втома» конструкції, що призводить до руйнування матеріалу від дії звукової хвилі.

Є, однак, досить широкий клас машин, у яких вібрація виконує не шкідливу, а корисну роль і є основою робочого процесу. Ці машини так і називаються — машини вібраційного принципу дії. Вони виконують найрізноманітніші технологічні операції і розцінюються зараз як основа технології майбутнього. Коли коливання і вібрація мають руйнівну силу, чи володіють принаймні здатністю створювати могутні, періодично повторювані силові впливи, ця їхня здатність використовується у техніці. Вібрацію застосовують для руйнування — дроблення і перемелювання матеріалів, з її допомогою пробивають міцні перекриття, занурюють палі в ґрунт, ущільнюють бетон, створюють штучні втомні полумки при випробуваннях матеріалів і т.д. Вібрацію застосовують для переміщення і сепарації сипучих матеріалів, а також рідин, для обробки поверхні матеріалу (металу) і у ряді випадків, коли потрібно підвищити міцність відповідної деталі дією перемінних напруг (нагартування) [92].

Технологічні процеси, зв'язані з механічною дією на матеріал чи виріб, як правило, вимагають наявності досить великих сил. Ці сили можуть бути прикладені різними способами: або статично (або «майже статично», наприклад, при штампуванні), або динамічно у вигляді періодично повторюваних імпульсів (ударів). Роль збудника періодичних імпульсів добре виконує вібрація.

12.2. Нормування вібрації

Вібрація є одним із важливих факторів навколишнього середовища, що впливає на здоров'я оператора і продуктивність праці, причому один із найбільших впливів вона має у системі оператор — трактор. Вплив вібрації на оператора залежить від спектрального складу коливань машинно-тракторного агрегату, напрямку, місця прикладання, тривалості дії, а також від індивідуальних особливостей оператора. Шкідливий вплив вібрації позначається на функціональному та фізіологічному стані оператора. Внаслідок впливу вібрації на функціональний стан збільшується втомлюваність оператора, зростає час рухової реакції, порушуються вестибулярні реакції і координація рухів, як наслідок, знижується продуктивність праці та якість роботи. Результатом вібраційного впливу є розвиток нервових захворювань, порушення функції серцево-судинної системи, опорно-рухового апарату, ураження м'язових тканин і суглобів, що призводить до виникнення різних професійних захворювань.

Вплив вібрації на оператора(працівника)

З гігієнічної точки зору різні умови праці при впливі вібрації характеризуються таким чином:

- 1) комфорт (вимушена вібрація не викликає подразливої дії);
- 2) збереження працездатності (втома оператора, викликана вібрацією, не призводить до зниження продуктивності праці);
- 3) вібраційна безпека (вібрація не спричинює шкідливої біологічної дії на організм оператора, що призводить до захворювання);
- 4) вібраційна небезпека (дія вібрації на організм оператора може викликати вібраційну хворобу);
- 5) вібраційне ураження (дія вібрації на організм оператора непереносима або створює небезпеку травмування чи навіть загибелі).

Так, з історії відомо, що під час російсько-японської війни у Цусимському морському бою 15 травня 1905 р. у гарматну башту російського броненосця «Орел» потрапив японський снаряд, причому матрос, який у той момент опирався на броню частиною тіла, загинув на місці і зовнішніх уражень на його тілі не було. Що ж стало причиною його смерті? Вірніше за все — вібрація.

Вібраційні впливи оцінюються на основі принципу частотно-вибіркової дії вібрації. Ця оцінка може здійснюватися за енергією механічних коливань, які передаються тілу людини[94],

$$A = T \sum_{i=0}^{\omega} V(\omega_i) |z(\omega_i)|, \quad (12.1)$$

де T — тривалість впливу вібрацій; $V(\omega_i)$ — i -та амплітуда гармонічної складової віброшвидкості; $|z(\omega_i)|$ — значення модуля вхідного механічного імпедансу, який являє собою відношення амплітуди сили, що передається тілу з точки збудження коливань, до амплітуди швидкості тієї самої точки, аргумент вхідного імпедансу описує зсув фаз між названими силою і швидкістю.

Імпеданс — опір руху від прикладеної сили. Механічний імпеданс[94]

$$Z_m = F / V, \quad (12.2)$$

де F — сила, V — швидкість.

Результати вимірювань вхідних механічних імпедансів тіла людини для різних поз і ділянок прикладання вібраційного збудження свідчать про те, що:

- резонансні властивості людини проявляються у ділянках частот, які лежать нижче 60 Гц;
- наявність додаткової опори для ніг людини, що сидить, істотно змінює характер частотної залежності імпедансу, однак числові значення модуля імпедансу в цьому діапазоні частот при цьому зменшуються;
- при додатковому навантаженні оператора максимум модуля імпедансу знижується у бік високих частот;
- імпеданс істотно змінюється при відхиленні корпусу оператора, при цьому на графіках модулів імпедансів з'являються максимуми при частотах нижче 5 Гц, що зумовлено згинальними коливаннями хребта[94].

Технічні й гігієнічні норми рівнів вібрації на сидінні

В Україні ДСН 3.3.6.039–99[95] встановлює класифікацію й гігієнічні норми вібрації, вимоги до вібраційних характеристик виробничого устаткування, у тому числі тракторів, засобів вібраційного захисту, контролю вібрації. Як параметр, що визначає характеристики вібрації, яка впливає на людину, прийнято середньоквадратичні значення віброшвидкості або її логарифмічні рівні у децибелах (дБ) в октавних смугах частот.

При частотному аналізі нормованими параметрами є середні квадратичні значення віброшвидкості V , м/с, віброприскорення a , м/с², і рівня віброшвидкості L_v , дБ. Для локальної вібрації показники цих параметрів

показані в октавних смугах з середньгеометричними частотами 1; 2; 4; 8; 16; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000 Гц, а для загальної вібрації — в октавних смугах або 1/3 октавних смугах, а для загальної вібрації — в октавних та 1/3 октавних смугах частот з середньгеометричними частотами 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; ...; 50; 63; 80 Гц.

Як параметр вібрації на робочому місці оператора прийняті середньоквадратичні значення прискорень в октавних і третьооктавних смугах. Логарифмічні рівні віброшвидкості, дБ[94],

$$L_v = 20Lg (V/(5 \cdot 10^{-8})), \quad (12.3)$$

де V — середньоквадратичне значення віброшвидкості; $5 \cdot 10^{-8}$ — опорна віброшвидкість.

Гігієнічні норми вібрацій, що впливають на працівника, наведено в ДСН 3.3.6.039–99[95], які встановлюють допустимі межі впливу вібрацій, що передаються від жорстких опорних поверхонь до тіла людини у частотному діапазоні 1...80 Гц. Ці межі вказані для використання відповідно до трьох загальноновизнаних критеріїв:

- 1) забезпечення продуктивності праці (межа зниження продуктивності праці від втоми);
- 2) забезпечення безпеки і здоров'я (межа впливу);
- 3) забезпечення комфорту (поріг зниження комфорту).

Напрямок вібрації, яка передається тілу людини, прийнято вимірювати у прямокутній системі координат, що починається з серця людини. Розміщення координатних осей при дії вібрації показано на рис. 12.1[94].



*Рис 12.1. Напрямки координатних осей:
вісь Z вертикальна відносно опорної поверхні;
вісь X — горизонтальна від спинки до грудей;
вісь Y — горизонтальна від правого плеча до лівого*

Рекомендовані межі впливу вібрації встановлені відповідно до трьох критеріїв, зображено графічно на рис. 12.2, 12.3. Вібрації (в даному випадку прискорення), що показані на рис. 12.2–12.5[94], виражено у середньквадратичних значеннях прискорення.

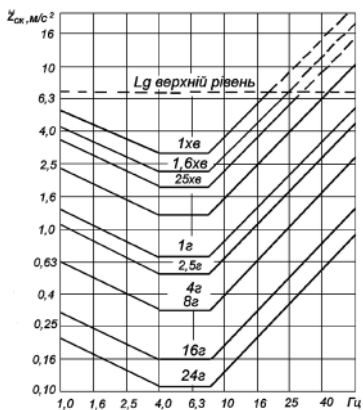


Рис. 12.2. Межі впливу вертикальної вібрації як функції частоти коливань і часу впливу (межа зниження продуктивності праці від втоми)

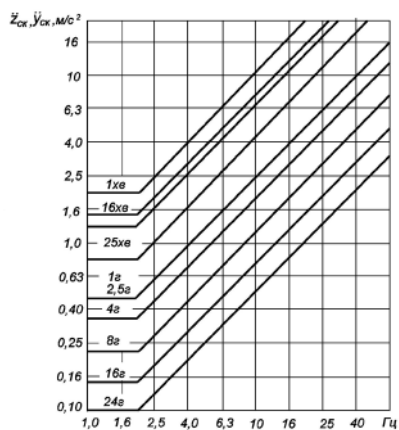


Рис. 12.3. Межі впливу горизонтальної вібрації як функції частоти коливань і часу впливу (межа зниження продуктивності праці від втоми)

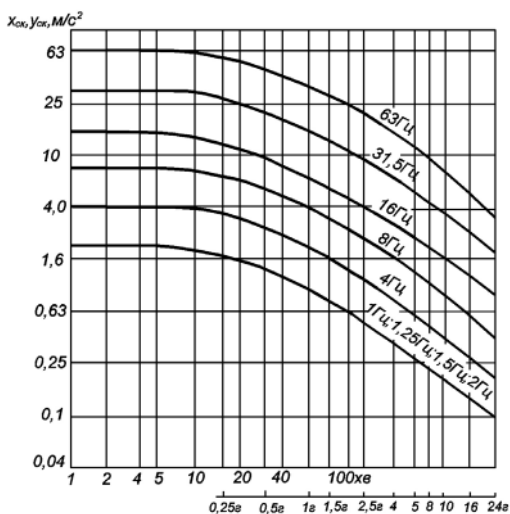


Рис. 12.4. Межі впливу горизонтальної вібрації як функції часу впливу і частоти коливань (частоти третьооктавної смуги; межа зниження продуктивності праці від втоми)

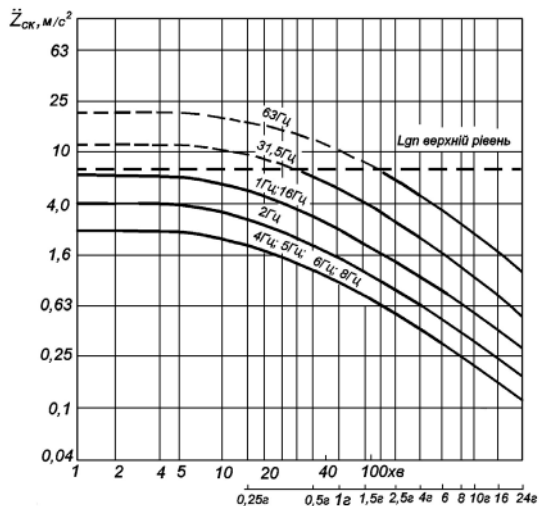


Рис. 12.5. Межі впливу вертикальної вібрації як функції часу впливу і частоти коливань (частоти третьооктавної смуги; межа зниження продуктивності праці від втоми).

«Межа зниження продуктивності праці від втоми» як функція частоти коливань і часу вібраційного впливу показана для часу вібраційного впливу від 1 хв. до 24 год. Перевищення цієї межі може призвести до значного зниження продуктивності праці при виконанні більшості робіт і особливо таких, які не припускають появи сильної втоми, наприклад при водінні транспортного засобу.

«Межа впливу» є також загальною формою оцінки дії вібрації, як і межа зниження продуктивності праці від втоми, але відповідні рівні збільшено у цьому випадку вдвічі (на 6 дБ вище), тобто максимально безпечна доза вібрації обчислюється для певних частот, напруг і тривалості цього впливу подвоєнням значень, припустимих відповідно до критеріїв «зниження продуктивності праці від втоми».

Значення рекомендованої межі впливу відповідає приблизно половині рівня, який вважається порогом появи хворобливих відчуттів (або порогом добровільної терпачості) для здорових людей, закріплених пасами на вібруючому стенді. За певних частот як вище, так і нижче смути максимальної чутливості, рівні прискорень, припустимі за нетривалого впливу вібрації відповідно до «межі впливу» і «межі зниження продуктивності

праці від втоми», перевищують 7 м/с^2 , що відповідає піковому значенню прискорення — приблизно 10 м/с^2 або близько одиниці для синусоїдальної вібрації і викликає підскоки оператора над сидінням.

«Поріг зниження комфорту» беруть приблизно як $1/3$ відповідних рівнів, прийнятих для меж зниження продуктивності праці від втоми. Значення порогу зниження комфорту одержують зменшенням на 10 дБ відповідних значень межі зниження продуктивності праці від втоми.

Для людини найбільш відчутними є діапазони частот 4...8 Гц за вертикальної вібрації і нижче 2 Гц — горизонтальної.

У нормативних матеріалах припустимі рівні встановлено для тривалості впливу протягом восьмигодинного робочого дня. Виключається виконання робіт при дії на оператора вібрації протягом 8 год з перевищенням заданих норм. При перевищенні встановлених норм вібрації тривалість її впливу на оператора протягом робочого дня рекомендується зменшити відповідно до даних, наведених у табл. 12.1.

Таблиця 12.1. — Допустима тривалість вібраційного впливу

Перевищення нормативів вібрацій для робочих місць, не більше		Припустима тривалість вібраційного впливу, хв, не більше
дБ	разів	
0	1	480
3	1,4	120
6	2	60
9	2,8	30
12	4	15

12.3. Методики та прилади, які використовують для вимірювання вібрацій

Існує багато об'єктів техніки, про поводження яких в експлуатації необхідні досить достовірні знання. У цьому випадку важливо вміти вимірювати і записувати процес коливань, який фактично відбувається. Або, наприклад, при експериментах з дослідним зразком машини, яка повинна бути пущена в серійне виробництво. Вимірювання потрібні також при перевірці прийнятої розрахункової моделі, на підставі якої встановлюється її прийнятність або необхідність коректування.

На підставі вимірювань коливань і вібрації можуть бути виявлені небезпечні стани об'єкта, зокрема близькість до резонансного стану, чи інші

види нестійкості, які породжують розгойдування коливань. По результатах вимірів вібрації й аналізу шуму можна діагностувати внутрішні дефекти, які порушують нормальне функціонування механізму. (Ще в давній давнині за рівнем вібрації, переданої через ґрунт, прогнозували землетруси.)

На сьогодні існує ціла галузь застосування коливань і вібрації у техніці випробувань. Для будь-якого дослідження повинна бути складена програма, що задає всі необхідні параметри, які визначають процес, і всі величини повинні бути вимірювані. Коливання і вібрацію вимірюють у їхньому джерелі і на випробуваному об'єкті.

Величини, які характеризують вібрацію та підлягають вимірюванню

1. Амплітуди коливань, а також їхні похідні величини — швидкості і прискорення. Ці величини можуть належать як до окремих точок (деталі, машини, споруди та ін.), так і до поступального руху, коли відбуваються прямолінійні коливання тіла, і до обертального руху, коли відбуваються кутові коливання об'єкта відносно постійної осі.
2. Частота коливань.
3. Фази коливань, що характеризують погодженість руху тієї чи іншої точки зі зміною у часі величини діючої сили або погодженість рухів різних точок тіла.
4. Силкові величини — сила і момент, взаємодіючі між об'єктами. Сюди ж належить звуковий тиск повітряного чи рідкого середовища при визначенні інтенсивності шуму.

Вимірювання одночасно руху та сили дозволяє визначати дослідним шляхом такі характеристики, як імпеданс, динамічна жорсткість, і зворотні їм величини.

Крім того, іноді необхідні більш складні характеристики руху, наприклад, статистичні характеристики, кореляційні залежності та ін.

Для вимірів і видачі відповідної інформації застосовуються вібровимірювальні прилади, вони здійснюють безпосередній відлік вимірюваних величин по шкалах, або роблять запис процесу руху. Записи переміщень, швидкостей і прискорень називаються віброграмами.

Електродинамічні датчики коливань та вібрації

Прилади, які є частиною вимірювальної системи, безпосередньо сприймають сигнали від механічного руху і передають їх для наступного виміру, реєстрації й аналізу, називаються датчиками. Існуючі датчики побудовані на самих різних фізичних принципах дії.

У сучасній складній техніці часто необхідні дуже чутливі засоби вимірів. Один з таких засобів — перетворення механічного руху в електричний сигнал, а потім посилення цього сигналу і його реєстрація.

Електричні датчики можуть: а) генерувати електричний сигнал під дією механічних коливань — вібрації; б) змінювати електричний сигнал шляхом зміни його параметрів (опору та ін.).

Один із принципів будови датчика, який генерує електричні сигнали, — електромагнітна індукція, заснована на появі електрорушійної сили на виводах обмотки при русі котушки у магнітному полі (рис. 12.6)[92].

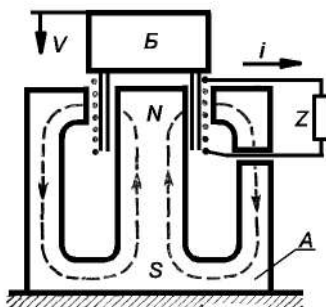


Рис. 12.6. Схема електроіндукційного датчика для вимірювання вібрації: А — постійний магніт; Б — котушка; V — швидкість котушки відносно нерухомого магніту; Z — навантаження; i — вихідний сигнал; N, S — полюси магніту.

Тут постійний магніт А укріплений на нерухомій станині, а котушка Б, механічно через пружний елемент зв'язана з вібруючим об'єктом (пружний елемент на рисунку не показаний), рухається поступально. Електрорушійна сила котушки пропорційна швидкості V котушки щодо нерухомого магніту. Щоб одержати дані, що відповідають переміщенням об'єкта, вихідний сигнал, який знімається з навантаження Z у вигляді напруги, повинний бути перероблений, у цьому випадку його треба проінтегрувати. Якщо потрібно одержати значення прискорення об'єкта, сигнал варто диференціювати. У деяких датчиках котушка жорстко зв'язана з приладом, а постійний магніт пружно підвішений до приладу.

Поряд з датчиками, що вимірюють поступальні переміщення, є датчики, пристосовані для вимірювань кутових переміщень і відповідної вібрації. Такі прилади називаються торсіографами.

До датчиків, електричні сигнали яких спрацьовують при зміні параметрів, належать індуктивні електромагнітні і ємнісні датчики. Принцип їхньої роботи полягає у тому, що залежно від величини повітряного зазору магнітного ланцюга або між провідниками виникає або зміна опору магнітопровода, або зміна ємності між провідниками.

До цієї ж групи датчиків належать дрові датчики, засновані на зміні опору дроту при деформації розтягання — стискання. Ці датчики вимірюють не безпосередньо переміщення, швидкості або прискорення. Вони прикріплюються до поверхні деформованого тіла і подають електричний сигнал, пропорційний деформації самого датчика, що точно відповідає деформаціям поверхні тіла.

У **п'єзоелектричних датчиків** перетворення механічної енергії в електричну засноване на виникненні електричних зарядів у деяких кристалах при дії на них сил.

Крім того, існують ще електронно-механічні датчики переміщення, фотоелектричні, акустичні, а також датчики, що використовують інформацію, яка доставляється в результаті відображення лазерного променя, спрямованого на поверхню вібруючого тіла. До них же належать так звані оптрони — датчики, що використовують інфрачервоне випромінювання.

В усіх випадках застосування датчиків, що перетворюють механічний рух в електричний струм, важливо, щоб у діапазоні вимірювань вихідна електрична величина була пропорційна вимірюваній механічній величині, тобто щоб датчик мав, як говорять, лінійну характеристику.

Для вимірювання частоти коливань служать **частотоміри**. Найпростіший з них — язичковий — являє собою набір сталевих вузьких пластин, затиснутих нижніми кінцями у твердій підставці. Довжина пластин неоднакова, тому частота їхніх вільних коливань різна — зменшується у міру збільшення довжини. Якщо розмістити прилад на вібруючому об'єкті, то при збігу частоти вібрації об'єкта з власною частотою однієї з пластин остання виявиться в стані резонансу і цим визначиться частота процесу.

Більш досконалий спосіб вимірювання частоти пов'язаний із застосуванням **стробоскопа**. Головний елемент механічного стробоскопа — обертовий диск із прорізами. Стробоскопічний ефект виходить від того, що при проходженні повз об'єкта прорізу в одній і тій же фазі, тобто при тому самому положенні об'єкта, він сприймається як нерухомий. За швидкістю обертання диска судять про частоту процесу.

Підсилювальна та реєструюча апаратура

Існуючі датчики не мають досить потужного сигналу, який можна використувати при вимірюваннях і реєстрації процесів. Тому в систему вводять підсилювачі. Ці прилади у процесі вимірювання підсилюють сигнал від перетворювача — датчика, а також сигнал, що створюється задаючим пристроєм, для передачі його збуднику вібрацій, коли потрібно сильне вібраційне збудження (наприклад, на дослідних стендах).

Попереднє посилення здійснюється так званими попередніми підсилювачами, що збільшують потужність вихідного сигналу від датчиків, які видають слабкий сигнал, а також виконують деякі інші функції. Вимірювальні підсилювачі доводять потужність сигналу до необхідного для реєстрації. На останньому етапі спеціальні прилади реєструють коливання.

Далеко не завжди відлік по шкалі подає повну інформацію про процес коливань (вібрації). У багатьох випадках потрібно тривале спостереження за процесами та їхнє вивчення. Сьогодні об'єм вимірювань і необхідної інформації надзвичайно великий. Крім того, потрібна фіксація значної кількості величин і тривалих процесів. Часом людина неспроможна виконати таку задачу. Тому створені прилади, що реєструють процес, фіксують і запам'ятовують його.

Результат вимірювань коливань, що знімається з виходу датчика після посилення, видається у вигляді електричного сигналу. Форма сигналу може бути різною:

- а) зображення на екрані чи на плівці;
- б) запис на магнітній стрічці, а потім звичайним способом;
- в) запис у цифровому форматі.

Методи і засоби документування інформації класифікуються за **фізичними і конструктивними ознаками**.

За **фізичною** ознакою вони поділяються на **механічні, електромагнітні** (світлові, магнітні, електричні, хімічні і теплові), **лазерні**.

До **механічного** належать олівцеві, чорнильні, друковані, перфораторні та ін.

До **електромагнітного** (включаючи світловий запис): відображення променя на екрані з візуальним використанням, фотографічні (для видимої й ультрафіолетової частин спектра), термографічні та ін.

Реєстрація з впливом магнітного поля на носій здійснюється магнітним, магнітохімічним і магнітоорієнтаційним способами. Реєстрація з впливом електричного поля на носій може проводитися у вигляді

електрофотографічного або електростатичного запису. До хімічних і теплових впливів належать електрохімічні зі зворотними і незворотними змінами, виробленими на носії, іскрове, плавильне, термохімічне й ін. Лазерна дія полягає у тому, що промінь лазера, відбиваючи від поверхні вібруючого тіла, несе інформацію про енергію вимірюваного руху та переробляючи її, видає результат виміру через лічильно-вирішальний пристрій.

За **конструктивним** принципом способи реєстрації поділяються на контактні, квазіконтактні і безконтактні (дистанційні).

При **контактних** способах реєстрації орган запису безпосередньо діє на носій.

При **квазіконтактному** способі відстань між органом запису і носієм відповідає розміру робочої частини органа запису, тобто вони знаходяться у безпосередній близькості один від одного.

До **безконтактного** належать такі способи реєстрації, при яких енергія, яка необхідна для реєстрації, передається на значну відстань між вихідним сигналом і носієм інформації (телепередача).

Які ж прилади здійснюють реєстрацію коливань (вібрації)?

Насамперед це **осцилографи**, **магнітографи**, **самописці**, проте сьогодні для реєстрації та обробки даних широко застосовують **мініатюрні комп'ютери**,

Так, електронно-променевий осцилограф (рис. 12.7)[92] (точніше, осцилоскоп, оскільки він не веде записи) складається з електронно-променевої трубки. У її вузький кінець вмонтована «електронна гармата», що складається з розжарюваного електричним струмом катода, який випромінює електрони, анода з позитивним потенціалом за відношенням до катода і фокусуючого пристрою, що зводить електрони у вузький пучок — електронний промінь. Електронний промінь, проходячи через два конденсатори C_1 і C_2 , відхиляється у двох площинах. Запис коливального процесу відтворюється на екрані.

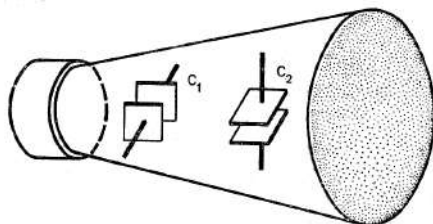


Рис. 12.7. Електронно-променевий осцилограф: C_1 , C_2 — конденсатори

У світлопроменевому осцилографі (рис. 12.8)[92] реєструєма електрична величина (напруга або струм) визначається по відхиленню світлового променя і відповідної плями на світлочутливому папері чи плівці. Світловий промінь подається за допомогою дзеркала або шлейфа, пов'язаного з гальванометром.

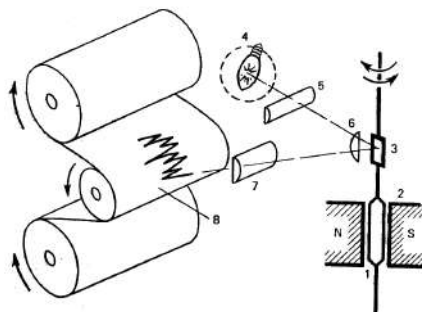


Рис. 12.8. Схема світлопроменевого осцилографа: 1 — рамка гальванометра; 2 — постійний магніт; 3 — коливне разом з рамкою дзеркало; 4 — джерело світла; 5 — конденсатор; 6 — лінза; 7 — конденсатор; 8 — світлочутлива стрічка, що рухається.

Магнітографи роблять запис на магнітній стрічці, вони записують інформацію, що надходить у формі електричних сигналів, і відтворюють її у такій же формі.

Самописці є стежачою системою, в якій сигнал від датчика приводить до руху механічного органу — важеля, що записує процес на папері за допомогою чорнила чи іншим способом.

На сьогодні вимірювальна техніка поповнилася **мініатюрними комп'ютерами**, вони служать засобом автоматизації обчислювальних робіт при проектуванні машин, споруд і при проведенні розрахунків у різноманітних наукових дослідженнях, а також засобом автоматичної обробки інформації, що доставляється в ході експерименту. Результати вимірів коливальних процесів вводяться в обчислювальну машину, а вона сама креслить графіки й обчислює функціональні й окремі числові характеристики процесу, у тому числі статистичні.

Таким чином, загальна схема вимірювальної системи складається з таких елементів:

- 1) датчиків, що вимірюють кінематичні величини: переміщення, швидкості і прискорення, а також механічні напруження на поверхні

деформованих тіл. Сюди ж можна віднести показники у найпростіших приладах, що дозволяють робити безпосередні відрахунки на шкалі;

- 2) перетворювачів сигналів, що надходять від датчиків (інтегруючі, диференціюючі, цифрові перетворювачі, а також інші функціональні, зокрема формуючі, статистичні характеристики процесів);
- 3) підсилювачів сигналів;
- 4) реєструючих приладів;
- 5) документації у різних формах (зображення процесу на екрані, запис на світлочутливій плівці, на магнітній стрічці, у електронному вигляді);
- 6) засобів автоматизації обробки експериментальних даних.

Методи вимірювання вібрації.

Методи дослідження вібрації у транспортних машин та стаціонарного обладнання поділяють на експлуатаційні та лабораторно-стендові.

Експлуатаційні випробування проводять на реальному фоні при виконанні машиною (трактором або іншою технікою) певної технологічної операції. Виміряні у відповідних точках обладнання прискорення дають можливість характеризувати ефективність віброізолюючої системи. Цей метод найбільш поширений, але є вартісним. Результати таких досліджень багато в чому залежать від погодних умов і апаратури, яка застосовується для вимірювання.

Зазначені вище методи випробувань мають такі переваги:

- 1) враховують вібраційні характеристики всієї машини;
- 2) при випробуваннях визначають абсолютний рівень вібрацій;

Стендові випробування вимагають створення дорогої апаратури, спеціальних програм для переходу від експлуатаційних режимів навантаження до лабораторних; до того ж, неможливе спостереження інших показників умов праці, які істотно впливають на втомлюваність оператора, але які не можуть бути враховані при цих дослідженнях.

Перераховані переваги експлуатаційних випробувань не виключають стендові, бо останні забезпечують можливість одержання числової порівняльної інформації, пояснюють їх окремі властивості. При стендових випробуваннях визначають такі важливі характеристики, наприклад, як частота власних коливань машини і амортизуючі властивості сидіння.

При випробуваннях сидіння з метою оцінки їх ефективності умови вирішального значення не мають, бо показником ефективності служать

параметри вібрації сидіння і кістяка машини. Цілком очевидно, що при оціночних випробуваннях машин на віброшвидкість нормативним показником умови й режими випробувань відіграють вирішальну роль.

Характеристики приладів, які використовують для вимірювання характеристик вібрації наведено у додатку 19[96–103], а чотири з них, портативний віброметр ПБТ-5М[100], віброметри TV 110[97, 98]; Walkom VM-6360[96] та AV-160A [101] зображені на рис. 12.9, 12.10, 12.11 та 12.12.



Рис. 12.9. Портативний віброметр ПБТ-5М[100]



Рис. 12.10. Віброметр TV 110[97]



Рис. 12.11. Віброметр Walkom VM-6360[96]



Рис. 12.12. Віброметр AV-160A [101]

Контрольні запитання.

1. Наведіть визначення вібрації та назвіть її види.
2. Укажіть, які характеристики вібрації вимірюють та які з них підлягають нормуванню?
3. Наведіть схему та поясніть принцип дії електродинамічних датчиків.
4. У чому сутність роботи п'єзоелектричних датчиків, які ще види датчиків, що вимірюють вібрацію ви знаєте?
5. Які методи дослідження вібрації ви знаєте?
6. Назвіть способи реєстрації вібрації.
7. Назвати види приладів, які реєструють вібрацію.
8. З яких елементів складається схема системи, що вимірює вібрацію?

ТЕМА 9.

СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВИДИМОГО СВІТЛА, УЛЬТРАФІОЛЕТОВОГО, ІНФРАЧЕРВОНОГО ТА ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЕННЯ

Лекція 13.

Системи контролю видимого світла, ультрафіолетового, інфрачервоного та лазерного випромінення

ПЛАН.

- 13.1. Види випромінень оптичного діапазону.
- 13.2. Видиме світло, фізичні одиниці, нормування та вимірювання.
- 13.3. Ультрафіолетове випромінення, його фізична природа, нормування та вимірювання.
- 13.4. Інфрачервоне випромінення, його фізична природа, нормування та вимірювання.
- 13.5. Лазерне випромінення, його фізична природа, нормування та вимірювання.

13.1. Види випромінень оптичного діапазону

Сучасне виробництво характеризують великою різноманітністю джерел оптичного випромінення, що пов'язано з великим поширенням високоенергетичних процесів у таких галузях промисловості, як металургія, машинобудування, скловаріння та інших галузях виробництва, все це обумовлює наявність джерел, які випромінюють в **інфрачервоній, видимій та ультрафіолетовій** частинах спектра, тобто охоплює весь оптичний діапазон електромагнітної енергії (табл. 13.1)[104].

Таблиця 13.1. — Класифікація випромінювань оптичного діапазону

Вид випромінювання	Довжина хвилі λ , м	Частота f , Гц
Інфрачервоні хвилі	$1 \cdot 10^{-3} - 7,6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{12} - 3,94 \cdot 10^{14}$
Видиме світло	$7,6 \cdot 10^{-7} - 3,9 \cdot 10^{-7}$	$3,94 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$
Ультрафіолетові хвилі	$3,9 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-8}$	$7,7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{17}$

Відповідно до гігієнічної класифікації джерел оптичного випромінювання, в основу якої покладені особливості біологічних ефектів, що формуються залежно від спектрального складу випромінювання, всі джерела підрозділяються на чотири групи[105]:

I GRUPA — випромінюючі в інфрачервоному діапазоні (температура від 35 до 1 500 °С) з підрозділом на підгрупи:

- а) з температурою від 35 до 300 °С з максимумом в області 10,0–5,0 мкм (нагріті поверхні устаткування, печей, підлог, конструкцій у ливарних, ковальсько-пресових, термічних цехах машинобудівних заводів, у склоробному та хімічному виробництві, опалювальні прилади, паропроводи теплоелектроцентралей та ін.)
- б) з температурою 300–700 °С з максимумом в області 5,0–3,5 мкм (нагрітий метал, вироби, що гартуються або обробляються у ливарних, ковальсько-пресових, термічних цехах машинобудівних заводів, скло в процесі формування, зварювальні процеси з підігрівом і т.д.);
- в) з температурою 700–1000 °С з максимумом в області 3,5–2,3 мкм (нагрітий метал у процесі плавлення, кування, загартування і т.п.);
- г) з температурою 1 000–1 500 °С з максимумом в області 2,3–1,0 мкм (розплавлений метал, шлак у металургії, розплавлена скломаса, лампи розжарення і т.п.).

II GRUPA — випромінюючі в інфрачервоному, видимому й ультрафіолетовому діапазоні з перевагою видимої ділянки спектра (температура 1 500–4 000 °С з максимумом в області 1,0–0,68 мкм) — електрична дуга у плавильних печах електросталеплавильного виробництва, низькоамперні зварювальні дуги, розплавлене кварцове скло, ацетиленове полум'я, лампи розжарювання та ін.

III GRUPA — випромінюючі переважно ультрафіолетового випромінювання (температура понад 4 000 °С з максимумом в області 0,8–0,1 мкм) — електричні дуги при високо амперних зварювальних процесах, дугові лампи в цинкографії, світлокопіювальних роботах і т.п.

IV GRUPA — спектральні випромінювачі, до яких крім люмінесцентних ламп, що випромінюють у заданій ділянці спектра, належить і лазерне випромінювання, що характеризуються когерентністю і монохроматичністю.

Залежно від особливостей ефектів, створюваних випромінюванням різних спектральних діапазонів, є розходження у підходах до їх оцінки, що відобразилось у розробці нормативів. Найширш широко застосовується оцінка ефектів взаємодії того чи іншого виду випромінювання з тканинами організму на основі енергетичного підходу, що покладено в основу розробки нормативів для ультрафіолетового, інфрачервоного і лазерного випромінювання. Видиме випромінювання в основному розглядається тільки з позицій впливу на орган зору, а саме, з позицій створення умов для оптимального функціонування зорового апарата при виконанні

визначеної діяльності, хоча не виключена і загальнофізіологічна дія випромінювання цього діапазону енергії.

В умовах сучасного виробництва широко застосовуються джерела оптичного випромінювання, енергія яких в УФ-частині спектра значно відрізняється від УФ-випромінювання Сонця, що досягає земної поверхні, як за спектром, так і за інтенсивністю. Це випромінювання електричних дуг при різних зварювальних процесах, в електрометалургії, при плазменних процесах. Широко використовується випромінювання, що утворюють люмінесцентні джерела (ртутно-кварцовими, метало-галогенними, ксеноновими й іншими типами ламп), що випускаються світлотехнічною промисловістю, у спектрі яких показане випромінювання в діапазоні довжин хвиль від 200 до 400 нм. Ці джерела набули застосування у сучасній поліграфії, в електротехнічній промисловості, при дефектоскопічних роботах, в умовах сільського господарства, на кіно- і телестудіях, у медицині.

13.2. Видиме світло, фізичні одиниці, нормування та вимірювання

Фізичні одиниці, що характеризують випромінювання оптичного діапазону

Найбільш широко для характеристики інтенсивності оптичного випромінювання при визначенні його дії на організм людини застосовують енергетичну та ефективну освітленості.

Енергетична освітленість (опроміненість в точці поверхні) визначається як відношення потоку випромінювання, що падає на елемент поверхні, на якій знаходиться ця точка, до площі цього елемента. Вона позначається символом E та вимірюється у Вт/м^2 [104].

$$E = d\Phi/dA, \quad (13.1)$$

де $d\Phi$ — потік або потужність випромінювання; dA — площа елемента поверхні.

Для вимірювання енергетичної освітленості в різних діапазонах довжин хвиль використовують радіометри оптичного випромінювання. Також її визначають за виразом:

$$E = K_{\lambda} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda. \quad (13.2)$$

де λ — довжина хвилі; λ_1, λ_2 — довжини хвиль ділянки спектра, в якому проводять вимірювання; $E(\lambda)$ — спектральна густина ділянки енергетичної освітленості; K_l — коефіцієнт пропорційності, який визначають вибором розмірності величин.

Світлова ефективна освітленість (освітленість у точці поверхні) визначається як відношення світлового потоку, що падає на елемент поверхні, який містить точку, до площі цього елемента. Освітленість позначається символом E_v та вимірюється в люксах(лк) приладами люксметрами[104].

$$E = d\Phi_v/dA, \quad (13.3)$$

де Φ_v — світловий потік(Лм).

Стандартна відносна спектральна чутливість $S(\lambda)$ люксметра повинна відповідати значенням відносної спектральної світлової ефективності оптичного випромінювання $V(\lambda)$, так що показання приладу I_v пропорційні вимірюємому значенню освітленості.

$$I_v = K_3 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) V(\lambda) d\lambda. \quad (13.4)$$

де K_3 — коефіцієнт пропорційності.

Нормування видимого оптичного випромінювання

Як відомо, для нормування **природного та суміщеного освітлення** згідно з вимогами ДБН В.2.5–28:2018[106] використовують відносну величину — коефіцієнт природної освітленості (КПО або D). Це є відношення освітленості, що утворюється на заданій площині світлом, одержаним безпосередньо або опосередковано від неба($E_{вн}$), до одночасної освітленості на горизонтальній площині внаслідок освітлення всією півсферою небосхилу(E_3). КПО(D) виражається у відсотках і визначається за формулою:

$$D = \text{КПО} = (E_{вн} / E_3) 100. \quad (13.5)$$

Нормування **штучного освітлення** здійснюється за допомогою $E_{\min}$, виходячи з умов зорової роботи, які згідно з [106] поділяються на розряди та підрозряди з урахуванням найменшого розміру об'єкта розрізнення, значень контрасту об'єкта розрізнення з фоном та характеристик фону, крім того, нормується показник засліпленості P ; коефіцієнт пульсації освітленості K_{Π} ; показник дискомфорту M тільки для громадських будівель.

Прилади для вимірювання видимого світла

Для контролю освітленості використовують люксметри різних типів, принцип дії яких полягає у перетворенні світла в електричний струм. В Україні ще досить поширеними є прилади Ю-116(рис 13.1) і Ю-117.



Рис. 13.1. Зовнішній вигляд приладу Люксметр Ю-116.

Вони за своїми діапазонами вимірювань охоплюють усю шкалу нормованих значень освітленості (табл. 13.2) [105].

Таблиця 13.2. — Характеристики приладів Ю-116 і Ю-117

Тип, країна виготовлення	Спектральний діапазон, мкм	Динамічний діапазон	Похибка вимірювань
Люксметр Ю-116 (СРСР)	0,38–0,72	5–30; 17–100(без насадок) 50–300; 170–1000 500–3000; 1700–10000 5000–30000; 17000–100000 (з насадками)	±10% ±5–7%
Люксметр Ю-117 (СРСР)	0,38–0,72	0,1–0,17; 0,17–1; 0,5–3; 1,7–10 (без насадок) 5–30; 17–100; (з насадками) 50–300; 170–1000 500–3000; 1700–10000 5000–30000; 17000–100000 (з насадками)	±10% ±5–7–15%

Останнім часом у розвинутих країнах світу розроблено та освоєно серійне виробництво люксметрів нового покоління, які працюючи на тому ж

принципі дії мають значно більші можливості у порівнянні з люксметрами Ю-116 та Ю117. Наприклад, прилад LX-1010BS[107](рис. 13.2) призначений для оціночних вимірювань.



Рис. 13.2. Люксметр Walcom LX-1010BS [107]

Відсутність світлових фільтрів призводить до похибки у 10 Лк. Більш досконалий люксметр ТМ-202[108] має фільтр для відсікання випромінення поза видимим діапазоном та має такі функції: індикація перевантаження; малого заряду батареї; фіксація значень, функція максимального, мінімального та середнього значення. Цей універсальний люксметр призначений для вимірювання рівнів освітленості, які створюють усі відомі джерела світла. Порівняльні характеристики зазначених вище приладів наведені у табл. 13.3[107, 108].

Таблиця 13.3. Характеристики сучасних приладів для вимірювання освітленості робочої зони

Фірма, тип приладу, країна	Walcom LX-1010BS (Китай)	Tenmars Electronics TM-202 (Тайвань)
Характеристики		
Діапазон вимірювання, Лк	0–10 ⁵	20–2·10 ⁵
Похибка, %	±4% ± 10 одиниць	±3% (відкалібровано по лампі розжарювання 2856 К, ±6% по інших джерелах світла)
Час спрацювання, с	0,4	–
Датчик освітленості	кремнієвий фотодіод	кремнієвий фотодіод
Габарити, мм	116 x 70 x 29	130 x 55 x 38
Вага, г	200	250

Розробка у 1991 р. та широке використання світлодіодних джерел білого світла виявило наявність у діапазоні 400–500 нм їхнього спектра випромінювання синього світла, яке є фітобіологічною небезпекою для очей. Все це зумовило розробку люксметрів, спеціально призначених для аналізування їхнього випромінювання. Типовими прикладами цих приладів є TM-201L[109], TM-209[110], TM-209N[111], TM-209M[112](рис. 13.3).



Рис. 13.3. Люксметр для вимірювання рівнів освітленості від світлодіодних джерел світла Tenmars Electronics TM- 209M[112].

Таблиця 13.4. — Характеристики приладів для вимірювання рівнів освітленості від світлодіодних джерел світла

Фірма, тип приладу, країна	Tenmars Electronics TM-201L (Тайвань)	Tenmars Electronics TM-209 (Тайвань)	Tenmars Electronics TM- 209N (Тайвань)	Tenmars Electronics TM-209M (Тайвань)
Характеристики				
Діапазон вимірювання, Лк	200–2·10 ⁵	40–4·10 ⁵	40–4·10 ⁵	40–4·10 ⁵
Призначення	Для вимірювання неонових та світлодіодних джерел	Для вимірювання ламп розжарювання, флуоресцентних та білих світлодіодних джерел	Для вимірювання неонових та світлодіодних джерел	Для вимірювання багато-кольорових світлодіодних джерел
Точність, %	± 3(8)	± 3(6)	± 3(6)	± 3(6)
Габарити приладу, мм	130 x 55 x 38	130 x 55 x 38	130 x 55 x 38	130 x 55 x 38
Вага, г	250	250	250	250

Вони обладнані світлофільтрами та високочутливими кремнієвими фотоелементами, застосовано косинусну кутову корекцію для випадку поперечного освітлення, їм притаманна висока точність вимірювання ($\pm 3\%$ при калібруванні за стандартною лампою розжарення 2 856 К, ± 6 або 8% за іншими джерелами світла). Порівняльні характеристики зазначених вище приладів наведені у табл. 13.4.

Контроль яскравості робочих поверхонь здійснюється як яскравомірами, так і мультифункціональними приладами(люксметр-яскравомір), їх порівняльні характеристики наведені у додатку 20[113–118].



Рис. 13.4. Яскравомір Konica Minolta LS-100[114]

13.3. Ультрафіолетове випромінювання, його фізична природа, нормування та вимірювання

Ультрафіолетове випромінювання (УФ), яке лежить у межах 200–400 мкм чинить як корисну, так і небезпечну дію на організм людини. Як видиме випромінювання, так і ультрафіолетове поділяють на такі діапазони: УФ-А — (0,315–0,400 мкм); УФ-А1 — (0,315–0,340 мкм); УФ-А2 — (0,34–0,400 мкм); УФ-В (0,280–0,315 мкм); УФ-С — (0,200–0,280 мкм). Слід зазначити, що у ряді країн світу(США, Австралії та інш.) для оцінки шкідливої дії на організм людини УФ-випромінювання використовують значення допустимої дози за 8-годинний робочий день, мДж/см² на визначеній довжині хвилі. Значення цих характеристик, які діють у США, відповідно до[119] наведені у табл. 13.5.

Таблиця 13.5. — Допустимі дози ультрафіолетового випромінення за 8-годинний робочий день для деяких відібраних довжин хвиль

Довжина хвилі, Нм	Допустима доза за 8-годинний робо- чий день, мДж/см ²	Довжина хвилі, нм	Допустима доза за 8-годинний робо- чий день, мДж/см ²
200	100,0	260	4,6
210	40,0	270	3,0
220	25,0	280	3,4
230	16,0	290	4,7
240	10,0	300	10,0
250	7,0	305	50,0
254	6,0	310	200,0

В Україні до 1.01.2017р. діяли СН 4557–88(ДНАОП 0.03–3.17–88)[120], у яких величиною, що характеризує УФ-випромінення є опроміненість, Вт/м². Проте цей документ наразі є відміненим розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.01.2016р. №94-р)[121]. Огляд великої кількості джерел інформації дозволяє стверджувати, що у теперішній час розробляється новий нормативний документ, за яким і буде проводитись нормування ультрафіолетового випромінювання в нашій країні.

Як відомо, великі інтенсивності **УФ-випромінення** можуть бути причиною професійних уражень очей, шкірних покривів та інших ушкоджуючих ефектів, що обумовлюються фотохімічною дією випромінювання. Джерелами цього випромінення є тіла, температура яких вище 1 200 °С. У ковальсько-пресових, ливарних та термічних цехах — це вироби у процесі кування, високотемпературні загартувальні печі-ванни та деталі, які виймають з них, поверхня рідкого металу у плавильних печах та при його розливанні у форми, також воно виникає при дугових зварювальних процесах тощо. Разом з тим у деяких галузях виробництва, де за умовами технології є недостатнє надходження природного світла, застосовуються спеціальні установки (фотарії) для додаткового УФ-опромінення організму робітника, або в наявні системи освітлення додаються лампи, що випромінюють в УФ-спектрі (ЛЕ-30, ЛЕ-40 та ін.).

Ультрафіолетове випромінення вимірюють за його фотохімічним або фотоелектричним ефектом, причому найбільш поширеними є радіометри(Аргус-04)(рис. 13.5), вимірювачі ультрафіолетового випромінення (Extech UV 505), прилади для вимірювання потужності УФ-випромінення (UVAB TENMARS TM-213), їх характеристики наведені у додатку 21[122–127].



Рис. 13.5. Радіометр Аргус-04 для вимірювання УФ-А випромінювання[122]

13.4. Інфрачервоне випромінювання, його фізична природа, нормування та вимірювання

Джерелами ІЧ випромінювання є всі нагріті тіла, температура яких є вищою навколишнього середовища, найбільша їх кількість притаманна термічним, ковальсько-пресовим, ливарним та іншим подібним виробництвам. Область цього випромінювання (0,76–1000 мкм) також ділять на діапазони: ІЧ – А (0,76–1,4 мкм); ІЧ – В (1,4–3 мкм); ІЧ – С (3–1 000 мкм).

Нормування здійснюється за інтенсивністю допустимих інтегральних потоків випромінювання E , Вт/м², відповідно до ДСН 3.3.6.042–99[5] з урахуванням розміру опромінюваної площі, захисних властивостей спеодягу та засобів індивідуального захисту.

Так, відповідно до [5], інтенсивність теплового опромінювання працюючих від нагрітих поверхонь технологічного устаткування, освітлюваних приладів, інсоляція від зашкленних огорожень не повинна перевищувати 35,0 Вт/м² — при опроміненні 50% та більше поверхні тіла, 70 Вт/м² — при величині опромінюваної поверхні від 25 до 50% та 100 Вт/м² при опроміненні не більше 25% поверхні тіла працюючого.

При наявності відкритих джерел випромінювання(нагрітий метал, скло, відкрите полум'я) допускається інтенсивність опромінювання до 140 Вт/м². Величина опромінювання не повинна перевищувати 25% поверхні тіла працюючого при обов'язковому використанні індивідуальних засобів захисту (спеодяг, окуляри, щитки) [5].

Високі рівні опроміненості інфрачервоним випромінюванням призводять до ураження очей, шкірних покривів, перегрівання організму та інших ефектів, що знижують опірність організму.

Це випромінювання дуже поширено у металургії, машинобудуванні (ковальсько-пресові, термічні, ливарні цехи та зварювальні дільниці),

виробництво та обробка скла, інші процеси, які пов'язані з нагріванням. Входить до складу випромінення, яке утворюється електричною дугою, плазмою, люмінесцентними джерелами світла та лампами розжарювання.

Вимірювання ІЧ випромінення здійснюється за допомогою радіометрів, актинометрів та інших приладів. Принцип їхньої дії полягає у перетворенні енергії інфрачервоного випромінення в електричний струм. Деякі типи цих приладів наведені у додатку 22[128–132].

Лазерне випромінення, його фізична природа, нормування та вимірювання

Слово «лазер» — аббревіатура, що утворена з початкових букв англійської фрази *Light amplification by stimulated emission of radiation* — посилення світла за рахунок створення стимульованого випромінювання. Отже, лазер, або оптичний квантовий генератор, — це пристрій, який випромінює електромагнітне випромінювання оптичного діапазону, принцип дії якого ґрунтується на використанні примусового (стимульованого) випромінювання.

Вони використовуються для створення точних вимірювальних приладів та інструментів; в оптичній локації; для передачі інформації у галузі зв'язку і на телебаченні; прецизійного (точного) зварювання; свердління тугоплавких та надтвердих матеріалів, у медицині при виконанні хірургічних операцій (офтальмологія) та ін. У лазерах утворюється когерентне випромінювання оптичного діапазону великої інтенсивності, у вузькому пучку, причому густина потоку потужності може досягати 10^{12} – 10^{13} Вт/см². Лазерні випромінювання охоплюють практично весь оптичний діапазон, від ультрафіолетової до інфрачервоної області спектра випромінювання (табл. 13.1).

Лазер як технічний пристрій складається з трьох основних елементів: активного середовища, системи накачки та відповідного резонатора.

Його основними технічними характеристиками є: довжина хвилі (λ), м (мкм); ширина лінії випромінювання та інтенсивність випромінювання лазерів (визначається за величиною енергії (Q) або потужності (Φ , Вт)); тривалість імпульсу (τ), с; частота імпульсів (f), Гц; енергетична експозиція (H), Дж/см².

Робочою речовиною у твердотільних квантових генераторах є кристали рубіну, скла з домішкою неодиму або диспрозію, вольфрамат кальцію, а в газових генераторах найбільш простого типу — суміш гелію з неоном і азотом.

Залежно від ступеня їх небезпечного випромінювання для обслуговуючого персоналу лазери поділяються на 4 класи:

клас I (безпечні) — вихідне випромінювання безпечне для очей;

клас II (малонебезпечні) — небезпечне для очей пряме, дзеркальне відбиття випромінювання;

клас III (середньонебезпечні) — небезпечне для очей пряме, дзеркальне, а також дифузне відбите випромінювання на відстані 10 см від відбиваючої поверхні і для шкіри пряме і дзеркально відбите випромінювання;

клас IV (високонебезпечні) — небезпечне для шкіри дифузне відбите випромінювання на відстані 10 см від відбиваючої поверхні.

Класифікація визначає специфіку впливу випромінювання на орган зору і шкіру. Головним критерієм для оцінки ступеня небезпеки лазерного випромінювання прийнята величина потужності (енергії), довжина хвилі, тривалість імпульсу та експозиції опромінення.

Існує класифікація лазерів за фізико-технічними параметрами, при цьому враховується агрегатний стан активної робочої речовини (твердий, рідкий, газоподібний), характер генерації (імпульсний, безперервний) спосіб накачки активної речовини (оптичний, електричний, хімічний та ін.).

За характером генерації випромінювання лазери підрозділяються на імпульсної дії (тривалістю випромінювання 0,25 с) і безперервної дії (тривалість випромінювання понад 0,25 с).

Проведення контролю лазерного випромінювання в Україні здійснювалось за допомогою наступних документів: СН 2392–81[133], СанПиН 5804–91[134], ГОСТ 12.1.040–83*[135], ГОСТ 12.1.031–81[136]. Причому [133] було внесено до реєстру ДНАОПів під наступним позначенням: ДНАОП 0.03–3.09–81. Проте у даний час всі ці документи скасовано розпорядженням Кабінету Міністрів України від 20.01.2016р. №94-р)[121] та наказу ДП «УкрНДЦ» від 25 грудня 2015р. №209[137]. Тому слід зазначити, що як і у випадку з нормуванням ультрафіолетового випромінювання, очевидно, у теперішній час на основі відмінених [133–136] розробляється новий нормативний документ, за яким і буде проводитись нормування лазерного випромінювання в нашій країні.

У раніше наведених джерелах інформації[2, 31, 105, 133–136] як **основний** нормований параметр лазерного випромінювання встановлена енергетична експозиція (H) опромінюваних тканин. Гранично допустимі рівні (ГДР) лазерного випромінювання належать до спектрального діапазону від 0,2 до 20 мкм і регламентуються на рогівці ока і шкірі. Крім того, для довжин хвиль від 0,4 до 1,4 мкм встановлені також ГДР енергетичної експозиції сітківки ока, а спеціально для видимого діапазону спектра (0,39–0,76 мкм), крім зазначених параметрів, нормується також енергія випромінювання (Q) на сітківці ока.

ГДР виключають появу первинних біологічних ефектів для всього спектрального діапазону і вторинних біологічних ефектів для видимої області спектра.

ГДР залежать від таких параметрів[105]:

- довжин хвиль лазерного випромінювання λ , мкм;
- тривалості імпульсу τ , с;
- частоти повторення імпульсів f , Гц;
- тривалості впливу серій імпульсів t , с.

У діапазоні 0,4–1,4 мкм ГДР додатково залежать від: кутового розміру джерела випромінювання α , рад, або від діаметра плями засвічення на сітківці d_c , см; діаметра зіниці ока d_s , см.

У діапазоні довжин хвиль від 0,4 до 0,75 мкм ГДР залежать від фоновій освітленості рогівки ока E_f , лк.

Для лазерів II – IV класу небезпеки та лазерних установок, до складу яких входять лазери цих класів, визначення рівнів опромінення персоналу повинно проводитися періодично, не рідше одного разу на рік у порядку поточного санітарного нагляду, а також у таких випадках: при прийнятті в експлуатацію нових лазерів (установок) II–IV класів; при внесенні змін у конструкцію діючих лазерів (установок); при зміні конструкції засобів захисту; при організації нових робочих місць. Вимірювання рівнів лазерного опромінення слід проводити при роботі лазера (установки) в режимі максимальної віддачі потужності (енергії), визначеної умовами експлуатації. У процесі пошуку і наведення вимірювального приладу на об'єкт випромінювання має бути знайдено також положення, при якому реєструються максимальні рівні лазерного випромінювання. Похибка вимірювання рівня лазерного випромінювання на робочому місці не повинна перевищувати $\pm 30\%$. При роботі лазера (установки) в імпульсно-періодичному режимі повинні вимірюватися енергетичні характеристики максимального імпульсу серії. Допускається при відомому часі впливу t проводити вимірювання енергетичної освітленості E_c з наступним перерахунком в значення енергетичної експозиції H_c за формулою[105]:

$$H_c = E_c t. \quad (13.6)$$

При оцінці ступеня небезпеки опромінення шкіри лазерним випромінюванням з довжиною хвилі від 0,2 до 20 мкм вимірюється енергетична експозиція опромінюваної поверхні, яка порівнюється з ГДР. Дозиметри лазерного випромінювання повинні забезпечувати усереднення енергетичної експозиції по діафрагмі діаметром не більше 3 мм. При оцінці ступеня небезпеки опромінення очей за первинними біологічними ефектами

слід виміряти енергетичну експозицію на вході приладу (рогівка) і порівняти виміряний рівень з ГДР опромінення для точкового джерела. Якщо виміряний рівень енергетичної експозиції (освітленості) менше ГДР, то опромінення вважається безпечним незалежно від геометрії джерела. Якщо виміряний рівень перевищує ГДР, то у цьому випадку повинен бути визначений кутовий розмір джерела випромінювання α за формулою[105]:

$$\alpha = \frac{d \cos \Theta}{R}, \quad (13.7)$$

де d — діаметр джерела випромінювання, см; Θ — кут між нормаллю до поверхні джерела і напрямом спостереження, градус; R — відстань від джерела випромінювання до точки спостереження, см.

Виміряний рівень випромінювання порівнюється з ГДР для даного кутового розміру джерела. Опромінення очей прямим лазерним випромінюванням прирівнюється до випадку опромінення очей випромінюванням від точкового джерела. При джерелі випромінювання складної конфігурації за його діаметр d береться найменший розмір. Усереднення енергетичної експозиції допускається по круглій вхідній зіниці з діаметром не більше 0,8 см. Кут поля зору приладу (кутове поле оптичної системи у просторі предметів) повинен бути більше кутового розміру джерела випромінювання. При необхідності перерахунок виміряних значень енергетичної експозиції рогівки ока в значення енергії, що поглинається сітківкою, проводять за формулою:

$$Q = 0,25\pi H_{ep} d_z^2 \tau_{ока}, \quad (13.8),$$

де H_{ep} — енергетична експозиція рогівки ока; $\tau_{ока}$ — спектральний коефіцієнт поглинання випромінювання сітківкою; d_z — діаметр зіниці ока.

При впливі на око лазерного випромінювання з довжиною хвилі від 0,4 до 0,75 мкм оцінка ступеня небезпеки випромінювання проводиться як за первинними, так і за вторинними біологічними ефектами. Оцінку ступеня небезпеки випромінювання за вторинними біологічними ефектами проводять шляхом порівняння виміряного значення енергетичної експозиції рогівки ока з відповідним ГДР.

Для проведення контролю рівнів лазерного випромінювання розроблені та серійно виробляються відповідні прилади — лазерні дозиметри «Ладин»[138, 139] та ЛД-07[140, 141](рис. 13.6), вимірювач для лазерної дозиметрії ИЛД-2М[105, 142](виготовлявся з 1980 рв. СРСР, зараз вже знятий з виробництва) (рис. 13.7), крім них можна використовувати також фотометри та радіометри з відповідними технічними характеристиками.



Рис. 13.6. Лазерний дозиметр ЛД-07[140, 141]



Рис. 13.7. Вимірювач для лазерної дозиметрії ИЛД-2М[142]



Рис. 13.8. Прилад для вимірювання потужності лазерного випромінювання SANWA LP-1[143].

Принцип дії цих приладів заснований на тепловій, механічній та фотоелектричній дії випромінювання. Лазерні дозиметри відрізняються високою

чутливістю та універсальністю, що дає змогу контролювати направлене, розсіяне безперервне, імпульсне, та імпульсно-модульоване випромінювання лазерного обладнання, дані про їх технічні можливості наведені у додатку 23, а характеристики деяких приладів для вимірювання потужності цього випромінювання(SANWA LP-1[143](рис. 13.8), SANWA OPM-572[144], ИМИ-01[145], РБК-7101[146])наведені у додатку 24.

Контрольні запитання

1. На які групи відповідно до гігієнічної класифікації поділяються джерела оптичного випромінювання?
2. Назвіть фізичні одиниці, що характеризують випромінення оптичного діапазону.
3. Які фізичні одиниці використовують для нормування природного, штучного та суміщеного освітлення?
4. Які ви знаєте джерела ультрафіолетового випромінення?
5. На які діапазони поділяють ультрафіолетове випромінення?
6. Як називаються прилади для вимірювання ультрафіолетового випромінення? У чому їх принцип дії?
7. Якою величиною нормують ультрафіолетове випромінення?
8. В яких одиницях вимірюють опроміненість ультрафіолетовим випроміненням?
9. Назвіть основні галузі промисловості та технологічні процеси, в яких наявні джерела інфрачервоного випромінення?
10. Якою величиною нормують інфрачервоне випромінення?
11. Як називаються прилади для вимірювання інфрачервоного випромінення? У чому їх принцип дії?
12. Що таке лазер, у яких галузях промисловості вони застосовуються?
13. Укажіть, з яких основних елементів складається лазер та назвіть основні його технічні характеристики?
14. Наведіть класифікацію лазерних випромінювачів залежно від ступеня їх небезпечного випромінювання для обслуговуючого персоналу.
15. Яка фізична величина встановлена як основний нормований параметр лазерного випромінювання?
16. Від яких параметрів залежать гранично-допустимі рівні(ГДР) лазерних випромінень?
17. Назвіть типи приладів, які застосовують для вимірювання лазерних випромінень? На якому принципі дії вони працюють?

ТЕМА 10.

ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ ТА ЕЛЕКТРИЧНОГО СТРУМУ

Лекція 14.

Вимірювання параметрів електромагнітних полів та електричного струму

ПЛАН.

- 14.1. Види, фізичні характеристики та джерела електричного струму, електричних, магнітних та електромагнітних полів.
- 14.2. Нормування параметрів електричних, магнітних та електромагнітних полів.
- 14.3. Загальні вимоги до проведення вимірювань та гігієнічна оцінка результатів досліджень. Прилади, які для цього використовують.
- 14.4. Аналогові та цифрові прилади, які використовують для вимірювання параметрів електричного струму.

14.1. Види, фізичні характеристики та джерела електричного струму, електричних, магнітних та електромагнітних полів

Життя на нашій планеті виникло в тісній взаємодії з електромагнітним полем Землі. Геомагнітне поле зазвичай відіграє пасивну роль захисту Землі від іонізуючих випромінювань, проте є для біосфери не тільки своєрідним щитом, але і є важливою умовою існування життя, бо людина і живі організми пристосувались до нього в процесі еволюції. Відомо, що на людину постійно діє постійне електричне поле Землі напруженістю $E = 120 \dots 150 \text{ В/м}$ (на один метр висоти). Таким чином різниця потенціалів у людини середнього зросту складає біля 200 В. При напруженості у $2 \times 10^5 \text{ В/м}$, яка виникає між поверхнею землі та грозовими хмарами, утворюється блискавка, а при $2 \times 10^4 \text{ В/м}$ — з високих загострених предметів починають стікати електричні заряди — утворюється коронний розряд, можливо утворення особливої форми атмосферної електрики «вогнів святого Ельма» (холодного полум'я). Щодо напруженості магнітного поля нашої планети, то вона складає $24 \dots 40 \text{ А/м}$ залежно від широти, однак ці значення теж непостійні. Під час магнітних збурень, що продовжуються від декількох хвилин до декількох діб, напруженість магнітного поля планети може зрости у тисячі, а іноді й у десятки тисяч разів. Ще у 30-ті рр. 20-го ст.

А.П. Чижевським, С.Т. Вольховером і японським дослідником Токатой був виявлений зв'язок між сонячною активністю, що викликає магнітні збурення, і швидкістю протікання фізіологічних процесів. Так, при різкому збільшенні напруженості магнітного поля Землі протягом доби (у рази), відповідно зростає смертність людей від серцево-судинних захворювань за цю ж добу. Встановлено, що на зміни геомагнітної активності у першу чергу реагує нервова система людини, це позначається на збільшенні (теж у рази) кількості автомобільних аварій при магнітних збуреннях.

З розвитком космонавтики людина стала віддалятися на такі відстані, де відсутній вплив земного електромагнетизму. Перебування людини поза земним електромагнетизмом, на думку біологів, — фактор, що може відбитися на життєдіяльності організму. Доведено, що значне зменшення геомагнітного поля через визначений відрізок часу здатне викликати суттєву зміну процесів життєдіяльності. Так, було підмічено збільшення смертності піддослідних тварин через два-три тижні перебування в екранованому від зовнішніх електричних полів просторі. Проте додатковий вплив на тварин штучними електричними полями напруженістю до 200 В/м і частотою 10 Гц, тобто за основними параметрами, подібними з природними, знімало порушення водяного обміну, що виникало в екранованому просторі у тварин і було першопричиною загибелі.

Якщо природне поле необхідно, а слабкі штучні поля певної інтенсивності та частоти мають навіть позитивну дію на тваринний світ, то відносно сильних полів цього сказати не можна, бо доведено їх шкідливу та небезпечну дію на тварин та людину, яка проявляється, перед усім, у порушеннях функціонального стану нервової та серцево-судинної системи.

Підводячи підсумок, слід відмітити, що до *природних джерел* належать[2]:

1. Електромагнітне поле (ЕМП) Землі, яке також включає геопатогенні зони; напруженість природного електричного поля Землі дорівнює 120–150 В/м, а магнітного – близько 24...40 А/м.
2. Космічні джерела радіохвиль (сонячні спалахи, випромінювання зірок тощо).
3. Процеси, які відбуваються в атмосфері Землі (блискавки, зміни в іоносфері).

До *штучних джерел* належать:

1. Пристрої, які спеціально створені для випромінювання електромагнітної енергії (радіо- і телевізійні станції, радіолокаційні установки, системи радіозв'язку, фізіотерапевтичні прилади та ін.).

2. Пристрої, що безпосередньо не призначені для випромінювання електромагнітної енергії у простір (лінії електропередач і трансформаторні підстанції, побутова і промислова техніка, оргтехніка тощо).

Спектр частот електромагнітних полів, що оточують людину, охоплює діапазон від 50 Гц (і менше) до 3×10^{26} Гц. Частоти менше $3 \cdot 10^4$ Гц належать до діапазону звукової частоти. Залежно від f (частоти) чи λ (довжини хвилі) увесь радіочастотний діапазон розбито на піддіапазони (табл.14.1)[2].

Таблиця 14.1 — Класифікація електромагнітних полів радіочастотного діапазону

Частоти f , Гц	Високі (ВЧ) $3 \times 10^4 - 3 \times 10^6$	Ультрависокі (УВЧ) $3 \times 10^6 - 3 \times 10^8$	Надвисокі (НВЧ) $3 \times 10^8 - 3 \times 10^{11}$		
Довжина хвилі λ , м	Довгі $10^4 - 10^3$ і середні $10^3 - 10^2$	Короткі $10^2 - 10$ і метрові 10^{-1}	Дециметрові $1 - 10^{-1}$	Сантиметрові $10^{-1} - 10^{-2}$	Міліметрові $10^{-2} - 10^{-3}$

Донедавна **небезпечними джерелами промислових ЕМП** вважалися, в основному, **випромінювачі радіочастотного діапазону** ($3 \times 10^4 - 3 \times 10^{11}$ Гц) і особливо надвисоких частот ($3 \times 10^8 - 3 \times 10^{11}$ Гц). Це потужні установи височастотного нагрівання, що застосовуються для плавки і кування металів, термічної обробки металів, діелектриків та напівпровідників; для вирощування напівпровідникових кристалів і плівок, іонізації газів, одержання плазми, при зварюванні та пресуванні синтетичних матеріалів (у тому числі в інертних газах) та ін. Як правило, при цих процесах виникають поля, що у сотні разів перевищують середнє природнє поле Землі.

Випромінювання надвисоких частот створюють і побутові прилади – мікрохвильові та індукційні печі, система сухої заморозки (по Frost) у холодильниках, стільникові телефони та ін.

У міжнародній системі одиниць (СІ) величини, пов'язані з електромагнітним полем, називають електричними. Як основна електрична одиниця вимірювання обрана сила електричного струму, яка вимірюється в амперах. У додатку 25[147] наведені основні величини, що характеризують електромагнітне поле та їх одиниці вимірювання.

За часовою залежністю величини, що характеризують електромагнітне поле, поділяються на такі основні види:

- 1) постійні (не залежні від часу);
- 2) гармонійні коливання;

- 3) довільні періодичні коливання;
- 4) модульовані коливання;
- 5) імпульси;
- 6) шуми.

На відміну від акустичних полів, які являють собою залежність однієї скалярної величини від часу, електромагнітне поле є більш складним об'єктом, бо є сукупністю двох взаємозалежних змінних полів — електричного і магнітного, які характеризуються векторами напруженості електричного поля $\vec{E}$ (В/м) і напруженості магнітного поля $\vec{H}$ (А/м) або магнітної індукції $\vec{B}$ (Тл)[2, 148].

Напруженості електричних і магнітних полів оцінюються за формулами:

$$E = U / L; \quad (14.1)$$

$$H = I / 2\pi r, \quad (14.2)$$

де U — напруга, В; L — відстань, м; I — струм, А; r — радіус кола силової лінії навколо провідника, по якому тече струм, м.

Магнітна індукція зв'язана з напруженістю магнітного поля співвідношенням:

$$B = \mu \mu_0 H, \quad (14.3)$$

де μ — магнітна проникність речовини; μ_0 — магнітна проникність вакууму, або магнітна стала, Гн/м. Слід зазначити, що співвідношення між значеннями напруженості магнітного поля і магнітної індукції таке: 1 мТл $\sim$ 800 А/м.

Фази коливання E та H відбуваються у взаємно перпендикулярних площинах. При поширенні у вакуумі чи у повітрі:

$$E = 377 H. \quad (14.4)$$

Електромагнітне поле несе енергію, яка визначається щільністю потоку енергії (ЩПЕ)[148] — це векторна фізична величина ($\vec{W}$), яка характеризується кількістю енергії, що протікає за одиницю часу через одиницю площі, орієнтовану перпендикулярно до спрямованості потоку, вимірюється у Вт/м², мВт/см², мкВт/см²).

Енергетичне навантаження є добутком квадрата потужності ЕМП і часу його впливу, виражається (В/м)² год для електричного поля та (А/м)² год — для магнітного поля). У діапазоні 300 МГц — 300 ГГц енергетичне

навантаження дорівнює добутку щільності потоку енергії на час дії (опромінювання), вимірюється в (мкВт/кв. см) · год [148].

Простір навколо джерела ЕМП умовно поділяють на дві зони: **ближню** (зона індукції) і **дальню** (зона випромінювання).

Ближня зона (зона індукції) — частина простору, що прилягає до джерела випромінювання, для всіх точок якого виконується умова:

$$r \leq \lambda/2\pi. \quad (14.5)$$

У ближній зоні електромагнітна хвиля не сформована, а електромагнітна енергія має переважно реактивний характер. Електричні й магнітні поля зміщені в часі, а співвідношення між ними головним чином залежить від координат зони, довжини хвилі і геометричних розмірів джерела випромінювання [148]. При збільшенні відстані від джерела E убуває обернено пропорційно кубу відстані, а H — обернено пропорційно квадрату цієї відстані.

Дальня зона (зона випромінювання) — зона сформованої електромагнітної хвилі, у якій співвідношення між електричною (E) і магнітною (H) складовими виражається як $E = 377H$ (14.4), відповідає відстані r (помилка обчислення відстані не перевищує $\lambda/16$), на якій одночасно виконуються нерівності $r \gg \lambda/2\pi$ та:

$$r^2 \geq 2D/\lambda, \quad (14.6)$$

де D — максимальний розмір джерела випромінювання).

14.2. Нормування параметрів електричних, магнітних та електромагнітних полів

Допустимі рівні ЕМП на робочих місцях при роботі з джерелами електромагнітних випромінювань (ЕМВ) установлюються відповідно до вимог ДСНІП 3.3.6.096–2002 [148], який поширюється на діапазони частот 50 Гц — 300 ГГц.

Відповідно до [148], постійні магнітні поля, а також змінні ЕМП на частоті 50 Гц нормуються за магнітною (H) та електричною (E) складовими ЕМП. Електромагнітні поля частотою 1 кГц — 300 МГц нормуються за інтенсивністю та енергетичними навантаженнями електричних та магнітних полів, ураховуючи час впливу. В діапазоні частот 300 МГц — 300 ГГц електромагнітне поле нормується за інтенсивністю та енергетичним навантаженням щільності потоку енергії (далі — ЩПЕ,

Вт/м²). У разі імпульсно-модульованих випромінювань нормованим параметром, що характеризує інтенсивність впливу ЕМП, є середнє значення ЩПЕ.

Граничнодопустимі рівні(ГДР) електромагнітних полів відповідно[148] повинні мати наступні значення.

Так, рівні постійних магнітних полів протягом робочого дня не повинні перевищувати 8 кА/м, а для тих, що утворюються випрямленим трифазним струмом, ГДР визначаються за формулою:

$$H_{\text{ГДР}} = \sqrt{(E_{\text{ГДР}})/T}, \quad (14.7)$$

де $E_{\text{ГДР}}$ — граничнодопустиме значення енергетичного навантаження протягом робочого дня, дорівнює 144 кА² год/м²; $H_{\text{ГДР}}$ — граничнодопустиме значення напруженості магнітного поля, кА/м; T — час впливу, год.

ГДР електричних полів частотою 50 Гц визначаються залежно від часу дії цього фактора на організм людини за робочу зміну. Перебування в електричному полі напруженістю до 5 кВ/м включно допускається протягом 8 годин робочого дня.

При рівнях напруженості електричного поля від 5 до 20 кВ/м включно допустимий час перебування в ньому вираховується за формулою

$$T = (50/E_{\text{ГДР}}) - 2, \quad (14.8)$$

де T — допустимий час перебування в електричному полі при відповідному рівні напруженості, год; E — напруженість електричного поля у контрольованій зоні, кВ/м.

При напруженості електричного поля від 20 до 25 кВ/м час перебування персоналу в електричному полі не повинен перевищувати 10 хвилин. Перебувати в електричному полі напруженістю понад 25 кВ/м без застосування засобів захисту забороняється. За потребою встановити допустиму напруженість електричного поля при регламентованому часі роботи в ньому рівень напруженості електричного поля (кВ/м) розраховують за формулою

$$E_{\text{ГДР}} = 50 / (T + 2), \quad (14.9)$$

де $E_{\text{ГДР}}$ — допустиме значення напруженості електричного поля протягом регламентованого часу роботи, кВ/м; T — регламентований час роботи в електричному полі, год. Розрахунок за формулою допускається у межах від 0,5 до 8 год.

При перебуванні персоналу протягом робочого дня в зонах з різною напруженістю електричного поля (далі — ЕП) час перебування розраховують за формулою

$$T_{\text{пр}} = t_{E1}/T_{E1} + t_{E2}/T_{E2} + \dots + t_{En}/T_{En}, T_{\text{пр}} = 8, \quad (14.10)$$

де $T_{\text{пр}}$ (8 год.) — проведений час, еквівалентний за біологічним ефектом перебуванню в ЕП нижньої межі напруженості, що нормується, год; t_{E1} , t_{E2} , t_{En} — час перебування в зонах, що контролюються, з напруженістю $E1$, $E2$, En , год; T_{E1} , T_{E2} ... T_{En} — допустимий час перебування в електричних полях $E1$, $E2$, En відповідних зон, що контролюються відповідно формули (14.7).

Кількість зон, що контролюються, визначається перепадом рівнів ЕП на робочому місці. Різниця в рівнях напруженості ЕП зон, що контролюються, не повинна бути більшою 1 кВ/м.

Рівні напруженості магнітного поля частотою 50 Гц при постійному впливі не повинні перевищувати 1,4 кА/м протягом 8-годинного робочого дня. Час перебування людини в магнітному полі напруженістю понад 1,4 кА/м регламентується табл. 14.2.

Таблиця 14.2 — Час перебування людини в магнітному полі напруженістю понад 1,4 кА/м[148]

Час перебування персоналу, годин	1	2	3	4	5	6	7	8
Напруженість магнітного поля, кА/м	6,0	4,9	4,0	3,2	2,5	2,0	1,6	1,4
Магнітна індукція, мТл	7,5	6,13	5,0	4,0	3,13	2,5	2,0	1,75

ГДР для змінного магнітного поля частотою 50 Гц при локальному впливі на кисті рук визначається за формулою

$$H_{\text{гдр лок}} = H_{\text{гдр заг}} \cdot 5, \quad (14.11)$$

де $H_{\text{гдр лок}}$ — ГДР змінного магнітного поля частотою 50 Гц при локальному впливі (кисті рук), А/м; $H_{\text{гдр заг}}$ — ГДР змінного магнітного поля частотою 50 Гц при загальному впливі (табл. 14.2), А/м.

Граничнодопустимі рівні неіонізуючого випромінювання радіочастотного діапазону.

ГДР електромагнітних полів у діапазоні частот 1 кГц — 300 МГц на робочих місцях персоналу слід визначати, виходячи з допустимого енергетичного навантаження та часу впливу, за формулами:

$$E = \sqrt{(EH_{\text{Е ГДР}}/T)}, \quad (14.12)$$

де E — граничнодопустиме значення напруженості електричного (В/м) поля; $EH_{\text{Е ГДР}}$ — граничнодопустиме значення енергетичного навантаження протягом робочого дня $(\text{В/м})^2 \cdot \text{год}$, T — час впливу, год.

$$H = \sqrt{(EH_{\text{Н ГДР}}/T)}, \quad (14.13)$$

де H — граничнодопустиме значення напруженості магнітного (А/м) поля; $EH_{\text{Н ГДР}}$ — граничнодопустиме значення енергетичного навантаження протягом робочого дня $(\text{А/м})^2 \cdot \text{год}$; T — час впливу, год.

Максимальні значення E , H та $EH_{\text{Е ГДР}}$, $EH_{\text{Н ГДР}}$ наведені в табл.14.3.

Таблиця 14.3 — Максимальні значення E , H та $EH_{\text{Е ГДР}}$, $EH_{\text{Н ГДР}}$ [148]

Параметри та одиниці вимірювання	Граничні значення в діапазонах частот				
	1–10 кГц	10–60 кГц	0,06–3 МГц	3–30 МГц	30–300 МГц
$E_{\text{ГДР}}$, В/м	1000	700	500	300	80
$EH_{\text{Е ГДР}}$ $(\text{В/м})^2$	120000	40000	20000	7000	800
$H_{\text{ГДР}}$, А/м	75	57	50	-	3,0*
$EH_{\text{Н ГДР}}$ $(\text{А/м})^2$	675	390	200	-	0,72*

*ГДР енергетичного навантаження магнітного поля поширюється на діапазон частот 30–50 МГц.

Значення ГДР напруженості електричної ($E_{\text{ГДР}}$) і магнітної ($H_{\text{ГДР}}$) складових залежно від тривалості їх дії наведені в табл. 14.4.

Таблиця 14.4 — Значення ГДР напруженості електричної ($E_{\text{ГДР}}$) і магнітної ($H_{\text{ГДР}}$) складових залежно від тривалості їх дії [148]

Час перебування персоналу, год	$E_{\text{ГДР}}$, В/м					$H_{\text{ГДР}}$, А/м			
	1–10 кГц	10–60 кГц	0,06–3 МГц	3–30 МГц	30–300 МГц	1–10 кГц	10–60 кГц	0,06–3 МГц	30–50 МГц
8	120	70	50	30	10	9,0	7,0	5,0	0,30
7	130	75	53	32	11	9,8	7,5	5,3	0,32
6	140	82	58	34	12	10,6	8,1	5,8	0,34
5	155	90	63	37	13	11,6	8,8	6,3	0,38
4	175	110	71	42	14	13,0	9,9	7,1	0,42

Продовження таблиці 14.4

Час перебування персоналу, год	Е _{ГДР} В/м					Н _{ГДР} А/м			
	1–10 кГц	10–60 кГц	0,06–3 МГц	3–30 МГц	30–300 МГц	1–10 кГц	10–60 кГц	0,06–3 МГц	30–50 МГц
2	250	140	100	59	20	18,4	14,0	10,0	0,60
1	350	200	141	84	28	26,0	19,7	14,2	0,85
0,5	500	280	200	118	40	37,6	27,9	20,0	1,20
0,25	700	400	283	168	57	52,0	39,5	28,3	1,70
0,12	1000	580	400	240	82	75,0	57,0	40,8	2,45
0,08		700	500	296	80	-	-	50	3,00

При тривалості дії менше 0,08 год подальше підвищення інтенсивності фактора не допускається.

У всіх випадках при зазначенні діапазонів частот кожний діапазон включає нижню і включає верхню межу частоти.

Одночасний вплив електричного і магнітного полів у діапазоні частот від 1 кГц до 3 МГц слід вважати допустимим за умови

$$E_H/E_{H_{ГДР}} + E_N/E_{N_{ГДР}} \leq 1, \quad (14.14)$$

де E_H та E_N — енергетичні навантаження, що характеризують вплив електричного і магнітного полів.

ГДР напруженості імпульсних електромагнітних полів (далі — ІЕМП) у спектральному діапазоні частот від 0 Гц до 1000 МГц на робочих місцях персоналу слід визначати виходячи з допустимого енергетичного навантаження та часу впливу за формулами 14.12 та 14.13. При цьому граничні амплітудні значення в спектральних діапазонах частот визначаються за [148], де вони наведені у табл.4.

У всіх випадках при зазначенні діапазонів частот кожний діапазон включає нижню і включає верхню межу частоти. Граничнодопустимі величини ЕМП у діапазоні частот 300 МГц — 300 ГГц слід визначати за формулою

$$W = K \cdot (E_{W_{ГДР}}/T), \quad (14.15)$$

де W — граничнодопустима величина щільності потоку енергії, Вт/м²;

$E_{W_{ГДР}}$ — граничнодопустима величина енергетичного навантаження становить 2 Вт · год/м² (200 мкВт · год/см²); K — коефіцієнт ослаблення біологічної ефективності, який дорівнює: 1 — для всіх випадків впливу, включаючи опромінення від антен — скануючих та обертових;

10 — для випадків опромінення від антен, що обертаються і сканують, з частотою не більше 1 Гц і шпаруватістю не менше 50; Т — час перебування в зоні опромінювання за робочу зміну, год. Проте у всіх випадках максимальне значення W не повинно перевищувати 1 мВт/см².

Значення ГДР щільності потоку енергії (W) залежно від тривалості дії ЕМВ наведені в табл. 14.5.

Таблиця 14.5 — Значення ГДР щільності потоку енергії (W) залежно від тривалості дії електро-магнітного випромінювання

Час перебування персоналу, год	8	7	6	5	4	3	2	1	0,5	0,25	0,20
Щільність потоку енергії мкВт/см ²	25	29	33	40	50	67	100	200	400	800	1000

При тривалості дії менше 0,2 години подальше підвищення інтенсивності фактора не допускається.

14.3. Загальні вимоги до проведення вимірювань та гігієнічна оцінка результатів досліджень. Прилади, які для цього використовують

Оцінка рівнів дії постійних магнітних полів, а також змінних ЕМП у діапазонах частот 50 Гц, 1 кГц — 300 МГц здійснюється шляхом вимірювання напруженості електричної і магнітної складових ЕМП, у діапазоні частот 300 МГц — 300 ГГц — шляхом вимірювання ЩПЕ з урахуванням часу перебування персоналу в зоні опромінювання.

Якщо установка має декілька робочих режимів, що відрізняються параметрами генерації, видом і розміщенням робочих елементів або випромінювальних систем та ін., вимірювання проводиться в кожному режимі при максимально використаній потужності.

Вимірювання ЩПЕ випромінювання антен, які обертаються і сканують, проводять при зупиненій антені в напрямі максимуму випромінювання при всіх робочих значеннях кута нахилу. Для відкритої місцевості з однорідним рельєфом результати, отримані при одному напрямі випромінювання, можуть бути розповсюджені на весь сектор, який захоплює антена при її русі в радіусі, на якому проводилось вимірювання. У випадках, які характеризуються неоднорідним рельєфом місцевості, наявністю будівель та інших споруд, необхідне проведення вимірювань на робочих місцях і в місцях можливого перебування персоналу при спрямованості випромінювання в місце вимірювання.

Якщо на робочому місці працюючого можливе опромінювання від декількох установок, що працюють одночасно, інтенсивність його має бути оцінена для кожного з вимірюваних джерел.

У разі використання приладів, які потребують урахування поляризації випромінювання, сумарна інтенсивність опромінювання визначається таким чином:

- у діапазоні частот 300 МГц — 300 ГГц вимірюється ЩПЕ, яка створюється в даній точці кожним джерелом окремо, отримані результати підсумовуються;
- у діапазоні частот < 300 МГц проводяться вимірювання напруженості поля від кожного джерела окремо при відключених інших. Сумарна інтенсивність опромінювання в кожній вимірюваній точці в разі наявності джерел, які працюють у частотних діапазонах, що мають однакові ГДР, розраховують за такими формулами

$$E = \sqrt{(E_1)^2 + (E_2)^2 + \dots + E_n^2}, \quad (14.16)$$

$$H = \sqrt{(H_1)^2 + (H_2)^2 + \dots + H_n^2}, \quad (14.17)$$

$$W = W_1 + W_2 + \dots + W_n \quad (14.18)$$

У разі наявності джерел, які працюють у частотних діапазонах, для яких установлені різні ГДР, необхідно дотримуватись таких вимог:

$$\begin{aligned} & (E_1)^2/(ГДР_1)^2 + (E_2)^2/(ГДР_2)^2 + \dots + E_n^2/(ГДР_n)^2 + (H_1)^2/(ГДР_1)^2 + \\ & (H_2)^2/(ГДР_2)^2 + \dots + H_n^2/(ГДР_n)^2 + W_1/ГДР_1 + W_2/ГДР_2 + \dots + \\ & W_n/ГДР_n \leq 1, \end{aligned} \quad (14.19)$$

де E та H — виміряні значення напруженості електричного і магнітного полів;

W — виміряні значення щільності потоку енергії.

Гранично-допустимі рівні відповідних частотних діапазонів.

У разі переривчатої дії ЕМП від двох або декількох антен, які обертаються або сканують, підсумовування значень ЩПЕ не проводиться в зв'язку з дуже малою можливістю одночасного опромінювання даної точки діаграми двох або декількох антен. Опромінюваність персоналу в цих випадках визначається сумарним енергетичним навантаженням за формулою

$$EH_w = EH_{w_1} + EH_{w_2} + \dots + EH_{w_n}, \quad (14.20)$$

де EH_{w1} , EH_{w2} , EH_{wn} енергетичні навантаження від кожної антени.

Сумарне навантаження не повинно перевищувати $2 \text{ Вт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$ ($200 \text{ мкВт} \cdot \text{год}/\text{см}^2$).

Якщо інтенсивність діючого на персонал ЕМП в діапазоні частот 300 МГц — 300 ГГц за робочий день змінюється, енергетичне навантаження на організм визначається сумою енергетичних навантажень за окремі періоди часу. Сумарне енергетичне навантаження при цьому не повинно перевищувати нормативних величин, установлених у таблицях 14.3 та 14.4.

Якщо має місце послідовне або одночасне опромінювання персоналу в безперервному і переривчастому (від антен, які обертаються і сканують) режимах, сумарне енергетичне навантаження розраховують за формулою

$$EH_w = EH_{wh} + EH_{wпп}, \quad (14.21)$$

де EH_w — сумарне енергетичне навантаження; EH_{wh} — енергетичне навантаження від безперервного опромінювання; EH — енергетичне навантаження від переривчастого опромінювання.

Граничнодопустима величина сумарного енергетичного навантаження становить при цьому $200 \text{ мкВт} \cdot \text{год}/\text{см}^2$.

Вимірювання енергетичних параметрів ЕМП включає в себе прийом енергії поля і детектування, тобто перетворення вихідного сигналу датчика у форму, зручну для його подальшої реєстрації й обробки. Для контролю рівнів електромагнітного випромінювання використовуються вимірювачі напруженості поля та густина потоку енергії (ГПЕ). Як датчики залежно від типу приладу використовуються антени, причому як ізотропні, так і ті, що потребують орієнтації.



Рис. 14.1. Радіочастотний аналізатор HF-58B[150]

Прилади для вимірювання різних характеристик електромагнітного випромінювання випускають у світі різні приладобудівні компанії, однією з яких є німецька Gigahertz Solutions. Порівняльні характеристики приладів для вимірювання щільності потоку електромагнітного випромінювання наведені у додатку 26[149–153], один з яких, радіочастотний аналізатор HF-58B[150], наведений на рис. 14.1. Прилади, які призначені для вимірювання напруженості електричних та магнітних полів, наведені у додатку 27[154–157], вигляд одного з них, вимірювача рівня електромагнітного фону АТТ 2593[155], наведено на рис. 14.2.



Рис. 14.2. Вимірювач рівня електромагнітного фону АТТ 2593[155]

14.4. Аналогові та цифрові прилади, які використовують для вимірювання параметрів електричного струму

Електричний струм — це спрямований рух заряджених часток. Він може бути утворений різними джерелами: електромагнітними генераторами різних типів; акумулятором (електрохімічними джерелами енергії); термодарами; фотоелементами та ін.

Дія електричного струму на людину може привести до загальних та місцевих електротравм. Забезпечення електробезпеки в електроустановках виробничого і побутового призначення постійного і змінного струму частотою 50 і 400 Гц досягається шляхом контролю значень напруги і сили струму в електричному ланцюзі, замикання якого може відбутися через тіло людини. Вимірювання забезпечені нормативно-технічною документацією, необхідними приладами, методиками і засобами перевірки.

Для вимірювання параметрів електричного струму та електричних мереж використовують дві принципово відмінні групи засобів вимірювальної техніки — аналогові та цифрові. У свою чергу, перші поділяють на електромеханічні та електронні.

Для засобів вимірювальної техніки прийнята єдина система найменувань і позначень. Позначення електромеханічних вимірювальних приладів складається з літери алфавіту, яка вказує на тип вимірювального перетворювача (механізму), і номера моделі (табл. 14.6)[147].

Таблиця 14.6. — Позначення електромеханічних вимірювальних приладів

Тип перетворювача	Умове позначення перетворювача	Приклад позначення приладу
Магнітоелектричний	М*	Міліамперметр М4262
Електромагнітний	Э	Амперметр Э514
Електродинамічний, феродинамічний	Д	Міліамперметр Д590
Індукційний	И	Трансформатор струму И106
Електростатичний	С	Вольтметр С5021
Термоелектричний	Т	Мілівольтметр ТІ31
Фотоелектричний, фотокомпенсаційний електронний	Ф	Вольтметр Ф5053
Випрямний	Ц	Комбінований прилад Ц4320
Самописний прилад, світло-променевий осцилограф	Н	Осцилограф НІ25
Міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювачі параметрів електричних кіл	Р	Міст для вимірювання параметрів мережі Р5016

*Примітка: * — використовуються літери російського алфавіту.*

В основу системи позначень електронних (аналогових і цифрових) вимірювальних приладів покладено вид вимірюваної величини. Всі прилади поділені на 22 підгрупи. Кожна підгрупа об'єднує прилади одного призначення і їй присвоюється велика літера (наприклад, А — прилади для вимірювання струму; В — прилади для вимірювання напруги; Ч — прилади для вимірювання частоти і часу і т.д.). Прилади кожної підгрупи розділяють за ознакою основної виконуваної функції на декілька видів, яким присвоюється позначення, що складається з позначення підгрупи і номера виду (наприклад, В2 — вольтметри постійної напруги; В3 — вольтметри змінної

напруги; В4 — вольтметри імпульсної напруги і т.д. До виду приладу через дефіс вказується номер розробки у десятичній системі, наприклад В2–10. При модернізації приладу до позначення виду додається велика літера за порядком алфавіту. Наприклад, позначення приладу В2–10А показує, що це вольтметр для вимірювання постійної напруги, десята розробка, в яку вперше введена модернізація (літера А). Позначення приладу, що вимірює декілька фізичних величин, складається з позначення підгрупи і літери К (комбінований). Так, наприклад, прилад ВК2–16 крім постійної напруги вимірює постійний струм та електричні заряди.

При випуску з виробництва до кожного ЗВТ додається технічний опис, де містяться вказівки про призначення приладу, відомості про технічні характеристики, електричні схеми, опис конструкції, методики вимірювань і повірки, інструкція щодо обслуговування та ремонту. На шкалах електро-механічних вимірювальних приладів наносяться умовні позначення, які дозволяють установити принцип дії, границі допустимої похибки, можливість його роботи за тих чи інших умов. Види умовних позначень установлюються державним стандартом. Структурні схеми сучасних аналогових вимірювальних приладів досить різноманітні, але їх можна зобразити узагальненою структурною схемою (рис. 14.3).



Рис. 14.3. Структурна схема аналогового вимірювального приладу, де X – вимірювана (вхідна) фізична величина, Y – показ приладу (результат вимірювання).

Пристрій перетворення містить масштабні та функціональні вимірювальні перетворювачі. Перші з них змінюють рівень (масштаб) вимірюваної величини з таким розрахунком, щоб змінений її рівень не перевищував номінального значення вхідної величини наступного вимірювального перетворювача. Функціональні перетворювачі призначені для перетворення однієї фізичної величини в іншу величину, пов'язану з нею лінійною або нелінійною функцією перетворення.

Основні вимоги, які пред'являються до вимірювальних перетворювачів, зводяться до забезпечення високої лінійності функції перетворення та стабільності коефіцієнта передачі у заданих межах вимірювання.

Основною особливістю **цифрових** вимірювальних приладів є наявність автоматичного переходу від аналогової до дискретної форми подання одного або двох сигналів на одному з етапів її перетворення у приладі, що виконується аналогово-цифровим перетворювачем. Це перетворення є принципово-якісною відзнакою таких приладів і серйозно впливає на їх технічні та метрологічні характеристики. До цього слід додати, що результат вимірювання відбивається на демонструвальному пристрої у вигляді числа, як правило, десяткового, або символів.

Аналогово-цифрове перетворення передбачає виконання трьох операцій: **дискретизацію**, **квантування** та **цифрове кодування** вимірюваної величини або функціонально з нею зв'язаного сигналу вимірювальної інформації(сигналу).

У літературних джерелах зустрічаються різні підходи до класифікації цифрових вимірювальних приладів. Їх класифікують за такими ознаками: за методами вимірювання (структурна схема), аналогово-цифрового перетворення; алгоритмом перетворення; режимом роботи; елементною базою. Останню класифікацію розглянемо більш детально.

За типом використовуваної елементної бази зазначені вище прилади поділяють на три групи: **електромеханічні**, **електронні** і **мікропроцесорні**.

Електромеханічним приладам, які у вимірювальному каналі мають електромеханічні елементи, властива низька швидкодія (до кількох десятків вимірювань за секунду) та мала надійність. З цих причин вони наразі витіснені більш досконалими приладами.

У електронних приладів елементною базою є електронні, напівпровідникові прилади, аналогові і цифрові інтегральні мікросхеми. Все це дозволяє досягати підвищення швидкодії і надійності, розширення функціональних можливостей при одночасному зниженні ваги, габаритів і потужності живлення приладів.

Застосування **мікропроцесорів** та мініатюрних комп'ютерів у приладах третьої групи привело до створення якісно нових вимірювальних приладів, серед яких є «інтелектуальні (думаючі)» прилади, здатні проводити будь-яку за складністю математичну і логічну обробку інформації, її аналіз та спілкування з оператором. На мікропроцесори може покладатись виконання таких **функцій**: автоматизація вибору границь вимірювань і нормалізація рівня вхідних сигналів; обчислення математичних функцій

та розв'язання системи рівнянь; автоматизація керування процесом вимірювання, до якого входить введення інформації, видача результатів вимірювання або управляючого сигналу (при використанні приладу у вимірювальних і керуючих системах); лінеаризація функцій перетворення; корекція похибок; статистична обробка результатів вимірювань; самокалібрування, самодіагностика, автоматизація та самоперірка.

Найважливішою перевагою мікропроцесорних приладів є розширення їх функціональних можливостей, що обумовлено переходом від жорсткої логіки роботи до програмно-керованої. Таким чином відкривається принципово новий шлях нарощування багатофункціональності таких приладів, які спираються на зміні програм їх роботи, заздалегідь записаних у постійному запам'ятовуючому пристрої. Основою їх будови є схемно-технічне та системно-програмне забезпечення, а всі виконувані ними функції, у тому числі й керуючі, задаються оператором або внутрішнім контролером програмним способом.

Характерною рисою мікропроцесорних приладів є те, що вони виготовляються програмно-керованими і належать до системних приладів, які можуть використовуватись не лише для окремих вимірів, але й для застосування у складі автоматизованих вимірювальних систем, автоматизованого керування, контролю та діагностики. Для організації взаємодії між собою та іншими приладами, або зовнішніми засобами забезпечуються стандартними засобами сполучення (інтерфейсами).

Масштабні вимірювальні перетворювачі

При вимірюванні електричних величин часто виникає потреба у прямо пропорційному перетворенні одного значення струмів, напруг, потужностей в інше, більше або менше. У таких випадках використовують **масштабні вимірювальні перетворювачі**, які змінюють значення цих величин у задану кількість разів із заданою точністю.

Масштабні перетворювачі поділяють на пасивні та активні. До **пасивних масштабних перетворювачів** належать шунти, резистори додаткові, подільники напруги, атенюатори, вимірювальні трансформатори струму та напруги, а до **активних масштабних перетворювачів** — вимірювальні підсилювачі.

Шунти. Шунти застосовуються для розширення межі вимірювання струму вимірювальних приладів. Вони бувають постійного та змінного струму. Шунт постійного струму являє собою манганінові стрижні або пластини, які впаюються у латунні, мідні або бронзові наконечники, зі струмовими (більш масивними) та потенціальними затискачами.

Струмовими затискачами шунт вмикається в розрив кола вимірюваного струму; вимірювальний магнітоелектричний прилад приєднується до потенціальних затискачів паралельно до шунта.

Залежно від умов застосування шунти бувають індивідуальними і каліброваними. Індивідуальні придатні тільки для того приладу, який з ним градувався. Калібровані шунти мають певний номінальний спад напруги (45, 75, 100, 150 або 300 мВ) і придатні для вмикання до будь-якого приладу, що має таку саму межу вимірювання. Шунти, призначені для вимірювання струмів до 30–50 А, звичайно монтують у корпусі приладу (внутрішні шунти). Для більших значень струму (до 10 кА) шунти роблять зовнішніми. Залежно від точності встановленого опору їх поділяють на класи 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5 та 1. Слід зазначити, що вони можуть бути з однією або з кількома межами вимірювання (рис. 14.4).

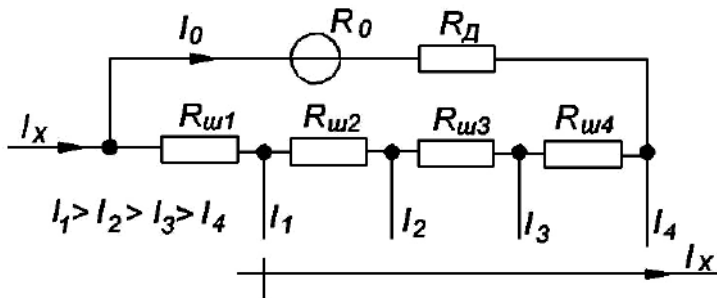


Рис. 14.4. Схема вмикання амперметра з декількома межами вимірювання

Аналогові електромеханічні прилади. Аналогові електромеханічні прилади бувають таких різновидів: **магнітоелектричні, електромагнітні, електродинамічні, феродинамічні, електростатичні.** Вони, як правило, складаються з первинного вимірювального механізму і показувального пристрою.

Первинний перетворювач служить для масштабного перетворення вимірюваної електричної величини X або перетворення її в іншу електричну величину Y , функціонально зв'язану з величиною X . Величина Y безпосередньо впливає на вимірювальний механізм, який складається з нерухомої і рухомої частин і перетворює електричну енергію в переміщення рухомої частини та жорстко зв'язаного з нею вказівника показуючого пристрою.

Рухому частину **вимірювального механізму** (котушку, феромагнітний сердечник, алюмінієвий диск) розміщують в електромагнітному полі

нерухомої частини і закріплюють на осі, розтяжках або підвісі. Вона обертається під дією обертального моменту, створеного механічними силами взаємодії магнітних або електричних полів рухомої і нерухомої частин механізму. Загальним виразом для обертального моменту будь-якого вимірювального механізму є рівняння Лагранжа другого роду:

$$M = dW_{\text{ем}}/d\alpha, \quad (14.22)$$

де $W_{\text{ем}}$ — енергія електромагнітного, електричного або магнітного поля, яка зосереджена у вимірювальному механізмі; α — кут повороту рухомої частини механізму. Під дією обертального моменту рухома частина повертається, доки $M_{\text{об}}$ не буде зрівноважений протидійним моментом $M_{\text{пр}}$, який створюється пружними елементами (пружинами, розтяжками, підвісом) і за напрямком є протилежним обертальному моменту. Він не залежить від вимірюваної величини і є пропорційним куту закручування пружного елемента:

$$M_{\text{об}} = W\alpha, \quad (14.23)$$

де W — питомий протидійний момент, який залежить від властивостей матеріалу пружного елемента; α — кут повороту рухомої частини механізму. При зміні вимірюваної величини рухома частина переходить у нове положення рівноваги не миттєво, а після кількох коливань навколо нього. Для зменшення часу заспокоєння застосовують заспокоюючі: повітряні; магнітоіндукційні (рис. 14.5) [147] та рідинні.

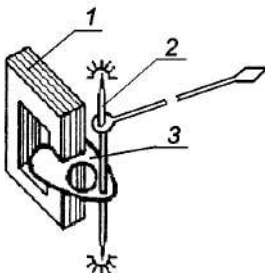


Рис. 14.5. Магнітоіндукційний заспокоювач: 1— постійний магніт; 2 — вісь; 3 — алюмінієвий сектор

Магнітоіндукційний заспокоювач являє собою постійний магніт 1, у зазорі якого може переміщуватись алюмінієвий сектор 3, закріплений на осі 2. При коливаннях рухомої частини у секторі утворюється струм, який,

взаємодіючи з магнітним полем постійного магніту, створює гальмівний момент. На рухому частину діє також і момент тертя, який виникає в опорах-підп'ятниках. Тертя залежить від якості матеріалів, обробки поверхонь кернів і підп'ятника, забруднення поверхонь, вологості та ін. Для зменшення моменту тертя як матеріал для опор використовують тверді мінерали (агат, корунд, рубін та ін.) діаметром 2–3 мм, які завальцьовують у латунний гвинт. Наявність тертя, з одного боку, сприяє більш швидкому заспокоєнню рухомої частини, а з іншого — вносить похибку в результат вимірювання.

Для одержання числового значення вимірюваної величини механізм приладу забезпечується **показувальним пристроєм**, який складається з шкали та вказівника, який буває стрілковим або світловим. Причому останній застосовують у приладах високих класів точності.

Магнітоелектричні прилади

Магнітоелектричні прилади використовують як амперметри, вольтметри, гальванометри постійного струму, балістичні гальванометри та осцилографи, омметри. Ці прилади працюють за принципом взаємодії магнітного поля нерухомого постійного магніту з магнітним полем провідника зі струмом, що проходить по рухомій котушці. Проте згадані вище механізми бувають з рухомою котушкою і нерухомим постійним магнітом і, навпаки, з рухомих постійним магнітом і нерухомою котушкою. Найбільш же поширеними є механізми з рухомою котушкою, які й розглядаються нижче.

Конструкція такого механізму показана на рис. 14.6[158].

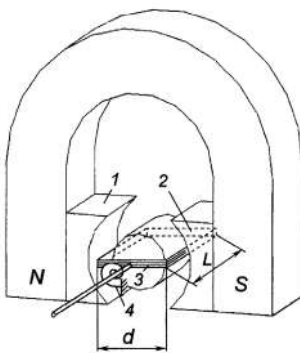


Рис. 14.6. Магнітоелектричний прилад: 1 – нерухомий підковоподібний постійний магніт з полюсними кінцями; 2 – нерухомий сталевий циліндр; 3 – рухома котушка; 4 – стрілка та спіральна пружина; d – діаметр рухомої котушки; L – довжина рухомої котушки

Котушка виконується з ізолюваного (переважно мідного) дроту і закріплюється на осях або розтяжках. Постійний магніт виготовляється з магнітотвердих матеріалів, а всі інші елементи магнітної системи — з магнітом'яких матеріалів. Струм у котушку подається через дві спіральні пружини, що ізолювані від осі. Ці пружини також призначені для створення протидіючого моменту. Позитивними якостями є: рівномірна шкала внаслідок того, що оборотний момент, який діє на рухливу частину вимірювального механізму, і кут повороту стрілки пропорційні вимірюваному струму. Приладам притаманна висока чутливість, точність, мала чутливість до зовнішніх магнітних полів, швидке встановлення стрілки та мале споживання енергії.

Найпростішими магнітоелектричними приладами є мікро- і міліамперметри, у яких весь вимірюваний струм проходить по обмотці механізму. В цьому разі межа вимірювання приладу не перевищує 30–50 мА. Для вимірювання більших значень струму використовують амперметри з шунтом. Лабораторні магнітоелектричні прилади виготовляють, як правило, з декількома межами вимірювань класів точності 0,1; 0,2; 0,5, а щитові — з однією межею вимірювання: 1,0; 1,5; 2,5.

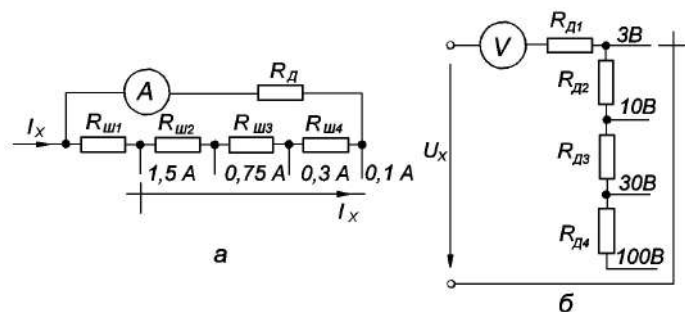


Рис. 14.7. Схеми магнітоелектричних приладів з декількома межами вимірювань: а — амперметр, б — вольтметр

Основна похибка магнітоелектричних приладів обумовлена причинами конструктивного і технологічного характеру (неточністю виготовлення і складання деталей механізму, неточністю градування шкали, неповною зрівноваженістю рухомої частини, тертям в опорах, старінням постійного магніту), похибками відліку, зміною температури довкілля та зовнішніх магнітних полів. На рис. 14.8 зображено вигляд магнітоелектричного міліамперметра М4200[159].



Рис. 14.8. Магнітоелектричний міліамперметр М4200[159].

Електромагнітні прилади

Принцип дії електромагнітного приладу ґрунтується на взаємодії магнітного поля, створеного вимірюваним струмом у нерухомій котушці, з феромагнітним сердечником. У цих пристроях електромагнітні сили намагаються перемістити осердя так, щоб магнітний потік у механізмі був найбільшим. Використовуються три конструкції вимірювальних механізмів: з плоскою котушкою(рис. 14.9)[158], з круглою котушкою та із замкнутим магнітопроводом.

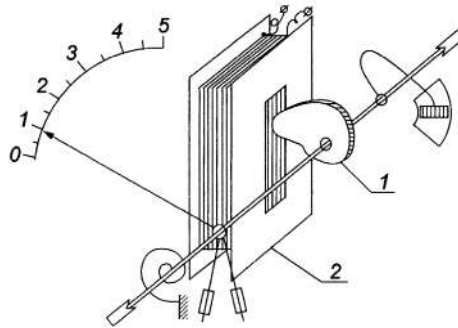


Рис. 14.9. Електромагнітний прилад з плоскою котушкою: 1 – осердя у вигляді пелюстки з м'якої сталі; 2 – котушка з щільною посередині

При протіканні струму по котушці осердя втягується в середину котушки з силою, прямо пропорційною квадрату сили струму.

Основна похибка електромагнітних приладів обумовлена технологічними та конструктивними властивостями вимірювального механізму, а додаткові — відхиленням від нормальних умов експлуатації. Найбільший внесок у значення додаткових похибок вносять зміна частоти струму та зовнішні магнітні поля. Для зменшення дії останніх застосовують екрановані та астатичні конструкції механізмів.

Електромагнітні прилади простіші за конструкцією і дешевші за інші, є надійними у роботі, вимірюють постійні та змінні струми і напруги, витримують значні перевантаження, зображення електромагнітного амперметра Э-514[160] наведено на рис. 14.10. Недоліком є низька точність (найвищий клас точності приладів 0,5), невисока чутливість, а також те, що їх використовують лише на частотах 50–60 Гц і у деяких випадках від 400 до 1 500 Гц.



Рис. 14.10. Електромагнітний амперметр Э-514[160]

Електродинамічні прилади

Принцип дії електродинамічних приладів полягає у взаємодії магнітних полів рухомої та нерухомої котушок зі струмом. Рухома котушка з'єднана по одній осі із стрілкою, крилом магнітного заспокоювача і двома спіральними пружинами (рис. 14.11) [158]. При проходженні струму по обом котушкам між ними виникає сила взаємодії, при цьому на рухому котушку діє пара сил, що викликає її поворот. Залежно від призначення приладів, котушки з'єднують по-різному. Так, у амперметрах, розрахованих на струм до 0,5 А вони увімкнені послідовно, а більше 0,5 А — паралельно.

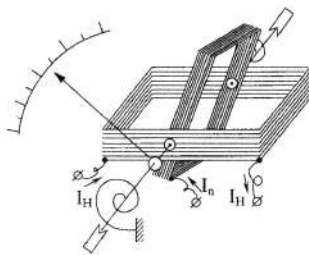


Рис. 14.11. Схема електродинамічного приладу

У вольтметрах обидві котушки увімкнені завжди послідовно. Шкала приладу нерівномірна, але відповідним вибором форми, розмірів котушок, і їх взаємного розташування вдається зробити шкалу рівномірною, за винятком їх початкової ділянки. Вони придатні для вимірювання постійних

і змінних струмів та напруг, а відрізняються високою чутливістю і точністю, найвищий клас точності — 0,1. Недоліками є складність виготовлення і, відповідно, висока ціна; через слабкі можливості для охолодження і значне власне споживання енергії не можна допускати перевантаження. Типовим прикладом таких приладів є міліамперметр Д 5 100, зображений на рис. 14.12.



Рис. 14.12. Електродинамічний міліамперметр Д 5 100[161]

Феродинамічні прилади

Феродинамічні прилади (рис. 14.13)[147] є різновидом електродинамічних.

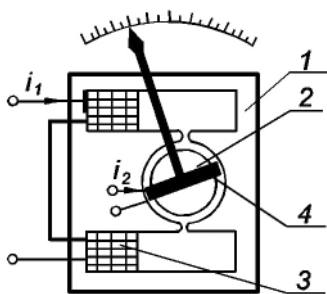


Рис. 14.13. Феродинамічний механізм: 1– магнітопровід; 2 – сердечник; 3, 4 – нерухома та рухома котушка відповідно

Від останніх вони відрізняються наявністю магнітопроводу з циліндричною виточкою, всередині якої розташовується сердечник. Магнітопровід і сердечник виконуються з ізольованих один від одного листів магнітової сталі чи пермалюю. У повітряному зазорі магнітної системи механізму створюється радіальне однорідне поле з магнітною індукцією, пропорційне струму в нерухомій котушці. Введення у вимірювальний механізм феромагнітного матеріалу, з одного боку, приводить до значного збільшення

оборотного моменту, що дозволяє використовувати ці механізми у самописних і реєструючих приладах, призначених для роботи в умовах вібрацій, а з іншого боку, знижує точність перетворювача у колах змінного струму.

Переносні феродинамічні амперметри та вольтметри мають клас точності 0,5, а вібростійкі щитові вольтметри — клас точності 1,5 та 2,5. Вони використовуються переважно для вимірювань у колах змінного струму частотою 50 та 400 Гц.

До аналогових засобів вимірювальної техніки належать також логометричні вимірювальні механізми, магнітоелектричні вимірювальні прилади з перетворювачами, потенціометри постійного струму, фото-гальванометричні компенсаційні вимірювальні прилади, потенціометри змінного струму, термоелектричні компаратори, електронні вольтметри та інші прилади. Характеристики деяких приладів наведені у додатку 28[162–170].

Електронні вольтметри.

Електронні вольтметри складають найчисленнішу групу серед радіовимірювальних приладів. Вони мають великий опір як на низьких, так і високих частотах, велику чутливість, споживають малу потужність від вимірювального кола, придатні для вимірювання середніх випрямних, квадратичних та максимальних значень змінних напруг, імпульсних сигналів надмалої тривалості (від наносекунд). Ці прилади за родом вимірюваної напруги поділяють на такі види: В2 — постійного струму; В3 — змінного струму; В4 — імпульсного струму; В6 — селективні, В7 — універсальні, В8 — вимірювачі відношення напруг та їх різниці.

Електронні вольтметри постійного струму дозволяють вимірювати постійний струм напругою від мікрвольт до 1 В, а з зовнішнім подільником і до 300 В. Вони складаються з подільника напруги (ПН), емітерного повторювача (ЕП), підсилювача постійного струму (ППС), магнітоелектричного мікроамперметра на 50–500 мкА та джерела живлення (ДЖ) (рис. 14.14).

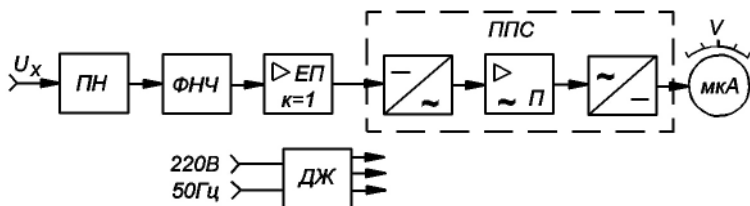


Рис. 14.14. Структурна схема електронного вольтметра постійного струму

Відносна основна похибка цих вольтметрів залежно від рівня вимірюваної напруги знаходиться у межах $\pm 0,5\text{--}6\%$. Типовим прикладом таких приладів є вольтметр В2–36, зображений на рис. 14.15[171].



Рис. 14.15. Електронний вольтметр постійного струму В2–36[171]

Електронні вольтметри змінного струму відрізняються від розглянутих вище приладів наявністю вимірювального перетворювача змінного струму в пропорційний постійний струм. Залежно від місця вмикання перетворювача (до або після підсилювача) розрізняють вольтметри типу перетворювач-підсилювач і типу підсилювач-перетворювач. У першому випадку вимірювана напруга спочатку перетворюється в постійну, а потім підсилюється підсилювачем постійного струму й вимірюється магнітоелектричним приладом. За цією схемою, зокрема, виготовляються **вольтметри максимальних значень** (рис. 14.16).

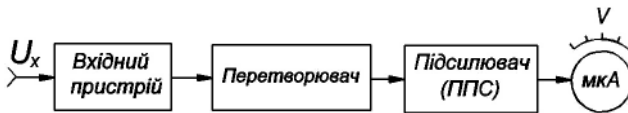


Рис. 14.16. Структурна схема електронного вольтметра максимальних значень

Ці прилади характеризуються широким частотним діапазоном вимірювання від 20 Гц до 1 000 МГц, вимірюють постійні напруги від 30 мВ до 300 В, змінні від 200 мВ до 300 В. Основна відносна похибка при вимірюванні постійних напруг $\pm 2\text{--}4$ та $\pm 4\text{--}6\%$ відповідно. У другому випадку змінна напруга підсилюється підсилювачем змінного струму, а після цього перетворюється у постійну, вони отримали назву **вольтметри середніх випрямних значень**. Останні будуються за схемою підсилювач-перетворювач (рис. 14.17).

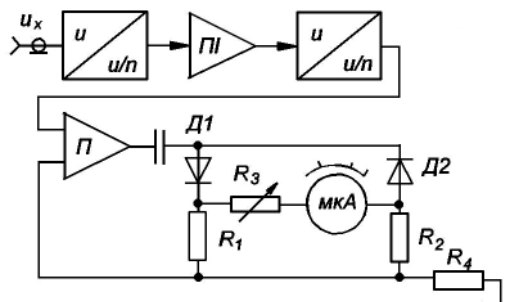


Рис. 14.17. Структурна схема вольтметра середньовипрямних значень

Такі прилади, наприклад, типів ВЗ–38А(рис. 14.18), ВЗ–39 забезпечують вимірювання середньо-квадратичних значень синусоїдних напруг у діапазоні частот від 20 до 5–10 МГц, їх основна відносна похибка складає 2,5% у межах вимірювання 3–1 000 мВ і 4% в інших межах вимірювання.



Рис. 14.18. Вольтметр середньовипрямних значень ВЗ-38А[172]

Характеристики електронних вольтметрів наведені у додатку 29[171, 173–182].

Цифрові вольметри. Світова електротехнічна промисловість зараз виготовляє значну кількість цифрових вольметрів різних типів, яких прийнято класифікувати за призначенням та видом вимірюваних величин. Це насамперед **вольметри постійної та змінної напруги; універсальні** — вони

дозволяють, крім основного свого призначення, вимірювати постійний та змінний струм, активний опір, відношення струмів та напруг, температуру (за допомогою вбудованої та додаваної у комплект приладу термопарою), ємність конденсаторів; **імпульсні** — призначені для вимірювання амплітуди імпульсних напруг. У сучасних цифрових вольтметрах постійного струму найбільш широко використовують методи час-імпульсного, кодоімпульсного та частотно-імпульсного аналогового перетворення.

У цифрових вольтметрах з час-імпульсним перетворенням використовують дві групи методів проміжного перетворення вимірюваної напруги у часовий інтервал: методи пропорційного часового перетворення миттєвих значень напруги та інтегрувальні методи.

Перший метод ґрунтується на порівнянні вимірюваної постійної напруги зі зразковою напругою, яка змінюється за лінійним законом і є лінійно-зростаючою у часі. Метод передбачає дві операції: перетворення вимірюваної напруги в пропорційний часовий інтервал і вимірювання цього інтервалу методом дискретної лічби. У цифрових вольтметрах застосовуються різні варіанти такого методу, які обумовлюють різні за складністю і метрологічними характеристиками схеми приладів.

Вольтметри, принцип дії яких ґрунтується на час-імпульсному методі, забезпечують відносну похибку близько 0,1%, чутливість близько 1мВ (з усередненням результатів вимірювання 0,1 мВ), швидкодію до сотень вимірювань за секунду.

Важливим показником технічної досконалості цифрових вольтметрів є ступінь їх захищеності від перешкод. Для заглушення перешкод застосовують вхідні фільтри і статистичне усереднення результатів багаторазових вимірювань. Проте застосування фільтрів хоча і забезпечує заглушення завад, але призводить до ускладнення приладу. Проте такі прилади все ж таки помітно поступаються перешкодозахищеністю аналоговим приладам, які мають властивість безперервного усереднення вхідних завад. Наблизити перешкодозахищеність цифрових час-імпульсних вольтметрів постійного струму до аналогових дозволяють інтегрувальні методи.

Інтегрувальні методи аналогово-цифрового перетворення ґрунтуються на перетворенні у код середнього (або інтегрального) значення вимірюваної напруги, яке може відбуватись в один, два чи три такти. Проте переважне застосування знаходить метод двотактного інтегрування. Високі значення перешкодозахищеності і точності приладів двотактного інтегрування забезпечують зростання об'єму їх випуску серед цифрових вольтметрів постійного струму, у вимірювачах відношення двох напруг,

у цифрових осцилографах, мультиметрах та інших приладах, в яких однією з проміжних операцій є вимірювання постійної напруги. Джерелами похибки є нестабільність опорної напруги, нелінійність вихідної напруги інтегратора та дрейф його нуля, поріг спрацювання компаратора і похибка квантування, неідентичність опорів комутатора по першому та другому входах.

Цифрові вольтметри постійного струму з частотним перетворенням

Принцип дії приладів цієї групи ґрунтується на попередньому перетворенні вимірюваної постійної напруги у пропорційну частоту імпульсів та її вимірюванні методом дискретної лічби за схемою цифрового частотомира. Функція перетворення, тобто залежність вихідної частоти перетворювача напруга-частота (ПНЧ) від вхідної є лінійною у діапазоні $0-U_{\max}$. Якщо перетворювач напруга-частота виконаний так, що його початкові частота f_n та напруга U_n дорівнюють нулю, то структурна схема вольтметра досить проста (рис. 14.19).

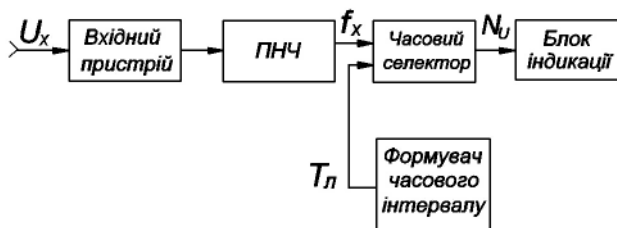


Рис. 14.19. Структурна схема цифрового вольтметра постійного струму з перетворювачем напруга-частота при $f_n = 0$

Формувач часового інтервалу задає на часовий селектор керуючий сигнал тривалістю T_n , протягом якого імпульси частоти f_x з ПНЧ потрапляють до блока індикації, де проводиться їх підрахування та індикація результату вимірювання. При $f_n \neq 0$ живають заходи для усунення f_n на результат вимірювання. Для цього f_n вибирають досить великим, наприклад, 1МГц. Перетворення напруги в частоту і її вимірювання здійснюється у два такти. У першому на вхід ПНЧ подається напруга заданої полярності. На виході ПНЧ виникає послідовність імпульсів частоти $f_1 = f_n + f_x$, які впродовж часу T_n підраховуються одним лічильником, вона дорівнює:

$$N_1 = \int_0^{T_{\text{л}}} (f_{\text{п}} + f_{\text{х}}) dt. \quad (14.24)$$

У другому такті на вхід ПНЧ подається інвертована напруга $U_{\text{х}}$, у цьому разі негативної полярності, відповідно частота на виході ПНЧ $f_2 = f_{\text{п}} - f_{\text{х}}$. Кількість імпульсів, які підраховуються другим лічильником за час $T_{\text{л}}$, дорівнює:

$$N_1 = \int_0^{T_{\text{л}}} (f_{\text{п}} - f_{\text{х}}) dt. \quad (14.25)$$

Потім визначається різниця кількість імпульсів:

$$\Delta N_{\text{л}} = N_1 - N_2 = 2 \int_0^{T_{\text{л}}} f_{\text{х}} dt = 2 K_{\text{ПНЧ}} T_{\text{л}} \bar{U}_{\text{х}} k_{\text{ПНЧ}}, \quad (14.26)$$

яка є результатом вимірювання. Вольтметри з частотним перетворенням мають досить високі метрологічні характеристики: похибку вимірювань до 0,01% і менше, високу чутливість (близько 1 мВ), заглушення перешкод того ж порядку, що й у цифрових вольтметрах подвійного інтегрування, швидкодію — сотні вимірювань за секунду. Найбільш високу точність мають вольтметри з ПНЧ на основі інтегратора з імпульсним зв'язком, а також на основі комбінованого використання частотного методу перетворення з методом час-імпульсного перетворення. Промисловість випускає перетворювачі напруга-частота у вигляді інтегральних мікросхем.

Цифрові вольтметри змінного струму

Цифрові вольтметри змінного струму застосовуються для вимірювання таких характеристик: миттєвого та середніх значень; середнього випрямного і квадратичного значення. Принцип побудови цих приладів є таким самим, як у аналогових електронних вольтметрів і полягає у проміжному перетворенні змінної напруги $u_{\text{х}}(t)$ в постійну напругу $U_{\text{х}}$ за допомогою вимірювального перетворювача. Основною відмінністю ж їх від аналогових є те, що напруга $U_{\text{х}}$ перетворюється завдяки аналогово-цифровому перетворювачу у пропорційний код, який відображається відліковим пристроєм блока індикації. Другою відмінністю є використання більш точних вимірювальних перетворювачів змінного струму в постійний, що пов'язано з невикористанням електромеханічних стрілкових приладів, які обмежують

точність аналогових вольтметрів. Вимірювальні перетворювачі змінного струму в постійний являють собою з'єднання підсилювача змінного струму і детектора середнього випрямного значення. Проте застосування таких перетворювачів призводить до залежності похибки від форми кривої напруги і частоти вхідного сигналу. Тому градують їх для синусоїдальної форми кривої струму, а нормування їх основних похибок здійснюється залежно від частоти і коефіцієнта гармонік вимірюваного струму. У зв'язку з тим, що ці прилади мають канал вимірювання постійної напруги, він може бути використаним в автономному режимі, якщо його вивести на вхід приладу через вхідний масштабний пристрій (подільник напруги або підсилювач). Такий вольтметр належить до універсальних (рис. 14.20).

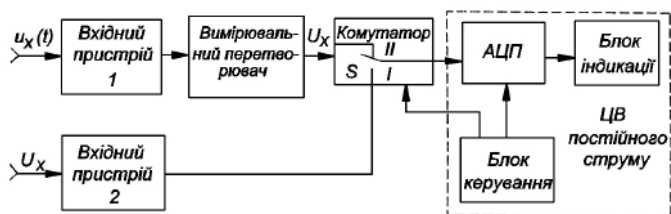


Рис. 14.20. Узагальнена структурна схема універсального цифрового вольтметра

Сучасні універсальні цифрові вольтметри виготовляють мікропроцесорними. Їх застосовують для вимірювання постійної та синусоїдальної напруг, активного опору, відношення двох постійних напруг, миттєвого значення вхідної напруги, відношення середньоквадратичного значення синусоїдальної напруги до постійної. Прилади мають тестовий контроль та інтерфейсний блок для з'єднання з каналом загального користування. Зв'язок з зовнішніми пристроями здійснюється блоком з'єднання, який для забезпечення гальванічної розв'язки розділений на внутрішню та зовнішню частини. Це дозволяє вольтметру взаємодіяти із зовнішніми пристроями, що мають заземлення, яке відмінне від наявного у вольтметра та джерела сигналу.

Конструктивно розглядувані вольтметри виконуються у вигляді одного блока, хоча у деяких розширення функціональних можливостей здійснюється за рахунок змінних модулів. Як останні використовують змінні плати та блоки-приставки. Великого поширення набули універсальні цифрові вольтметри типу тестерів з автономним живленням та (або) від мережі 220 / 380 В, частотою 50 Гц. Сильно зріс випуск щитових вольтметрів, їх похибки доведені до 0,05–0,1%. Прикладом універсального цифрового вольтметра є В7–64М[180], зображений на рис. 14.21.

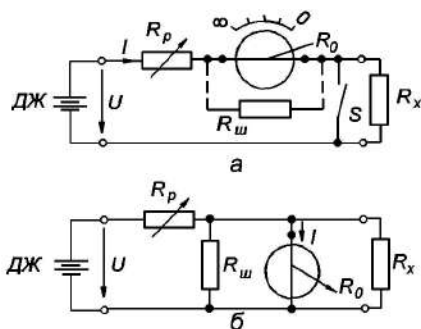


Рис. 14.22. Схеми омметрів: а – з послідовним; б – з паралельним вмиканням вимірюваного опору

Електронні омметри будують на базі операційних підсилювачів (рис. 14.23).

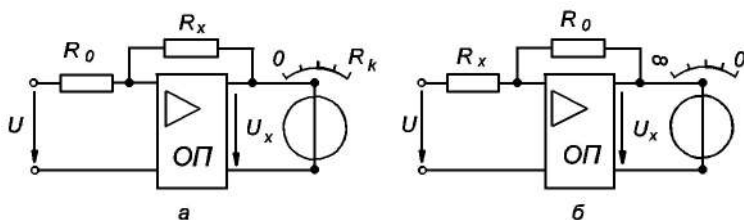


Рис. 14.23. Схеми омметрів на операційних підсилювачах: а – для малих опорів; б – для великих опорів

При вимірюванні малих значень опорів (до 10^6 Ом) на вході підсилювача вмикається зразковий резистор R_0 , а у коло негативного зворотного зв'язку – вимірюваний резистор R_x (рис. 14.23, а). Шкала такого омметра рівномірна з кінцевою границею вимірювань R_k . При вимірюванні опорів $> 10^6$ Ом резистори R_x і R_0 міняють місцями, тоді шкала омметра стає нерівномірною з нескінченною межею вимірювання. Для вимірювання опору ізоляції електроустановок використовують аналогові та електронні мегомметри (рис. 14.24 та 14.25 відповідно), їх порівняльні характеристики наведено у додатку 30[183–186].

Вимірювання активного опору **методом порівняння** проводять за допомогою **аналогових** і **цифрових** мостів постійного та змінного струму. Більш поширеними є мости постійного струму.



Рис. 14.24. Аналоговий мегаомметр ЭС0202/2-Г[183]



Рис. 14.25. Електронний мегаомметр Benetech GM3125[184]

Аналогові мости постійного струму поділяють на одинарні та подвійні (рис. 14.26, а, б).

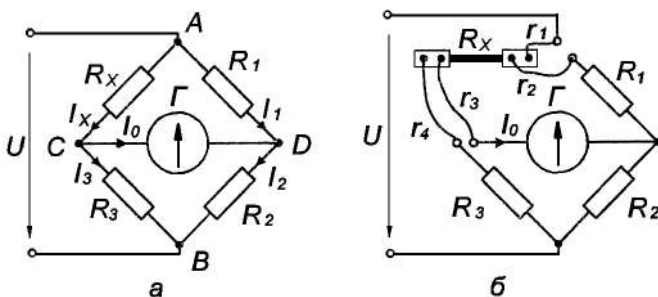


Рис. 14.26. Схеми одинарних аналогових мостів постійного струму: а – для вимірювання середніх опорів; б – для вимірювання малих опорів

Одинарні чотири плечі мости (рис. 14.26, а) застосовуються для вимірювання середніх та великих значень опору: від 10 до 10^6 – 10^7 Ом. Резистори R_1, R_2, R_3, R_x створюють плечі моста, AB і CD — відповідно діагональ живлення та діагональ індикаторного приладу (гальванометра — Г). Вимірювання мостом опору зводиться до його врівноваження. Це відбувається тоді, коли струм I_0 у вимірюваній діагоналі, тобто у гальванометрі дорівнює нулю, а відповідно і напруга між точками C і D теж дорівнює нулю. Тоді за другим законом Кірхгофа:

$$R_x = R_1 R_3 / R_2. \quad (14.27)$$

Врівноважування моста зазвичай здійснюють або зміною опору R_1 , виконаного у вигляді багато декадного магазину опору, або зміною відношення опорів R_3 / R_2 . У схемах, які застосовують на практиці, величини (R_1 та R_3 / R_2) виконують змінними. Відношення R_3 / R_2 вибирають кратним 10^n (причому $n = -3, -2, -1, 0, 1, 2$ і так далі), що дозволяє установлювати різні межі вимірювань при постійному значенні опору R_1 . Точність вимірювання опору мостовою схемою залежить від чутливості гальванометра, точності градуювання опору моста та від значення вимірюваного опору. На крайніх межах вимірювання похибка зростає. Хоча основна відносна похибка кращих зразків одинарних мостів постійного струму досягає сотих і навіть тисячних часток відсотка, проте точність звичайних неуврівноважених мостів не є високою. Перевагою їх є простота в експлуатації та висока продуктивність при масових вимірюваннях. Вимірювання малих значень опорів одинарним мостом обмежується тим, що це значення може стати порівняним із сумарним значенням опору з'єднувальних дротів і контактів у місцях з'єднання зазначених вище проводів з вимірюваним опором та мостом. Для усунення цього вимірюваний опір долучають до затискачів моста не двома, а чотирма дротами (рис. 14.26, б). При цьому дроти r_2 та r_4 та їх контактні з'єднання з вхідними затискачами моста опиняються ввімкнутими послідовно з великими опорами R_1 та R_3 , а з'єднувальні проводи r_1 та r_3 — відповідно у діагональ живлення та в діагональ гальванометра. Таким чином вплив опорів з'єднувальних дротів та контактних з'єднань максимально мінімізується.

Подвійні аналогові мости призначені для вимірювання дуже малих опорів від 10^{-8} до 20 Ом. У їхніх схемах вимірюваний опір R_x під'єднується до зажимів моста також чотирма дротами (рис. 14.27).

Хоча подвійні мости і є менш чутливими, ніж одинарні, проте вони забезпечують вимірювання малих значень опорів з основною відносною похибкою $\pm 0,02$ – 2% , яка збільшується при зменшенні значення вимірюваного опору.

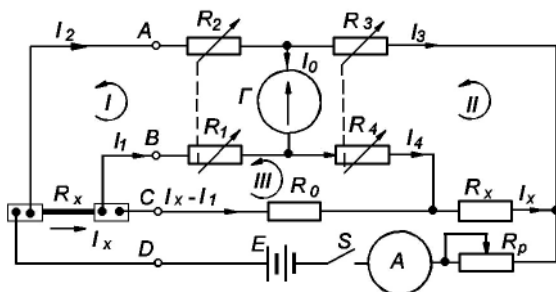


Рис. 14.27. Схема аналогового подвійного моста

Типовими прикладами розглянутих раніше приладів є комбіновані мости постійного струму (Р39, Р329, МО-61(рис. 14.28) та ін.), які дозволяють за допомогою спеціальних перемикачів створювати схему одинарного або подвійного моста і вимірювати опір у межах від 10^{-8} до 10^8 Ом. Порівняльні характеристики аналогових мостів наведені у додатку 31[187–193].



Рис. 14.28. Аналоговий комбінований міст постійного струму МО-61[187]

Основи теорії **цифрових мостів** постійного струму не відрізняються від аналогових мостів цього ж виду струму. Вони також можуть бути зрівноваженими та не зрівноваженими. Їх головними відмінностями від аналогових є автоматизація процесу зрівноважування, цифровий відлік показань і схемотехнічні розв'язання. Автоматизація процесу зрівноважування здійснюється за допомогою перетворювачів код-опір і перетворювачів код-провідність, виконаних на декадних подільниках напруги. За функціональним призначенням розрізняють цифрові мости для вимірювання

дійсних значень опору і для вимірювання відсоткових відхилень опору від номінального значення (цифрові відсоткові мости). Сучасний цифровий міст постійного струму являє собою чотириплечий одинарний міст (рис. 14.29).

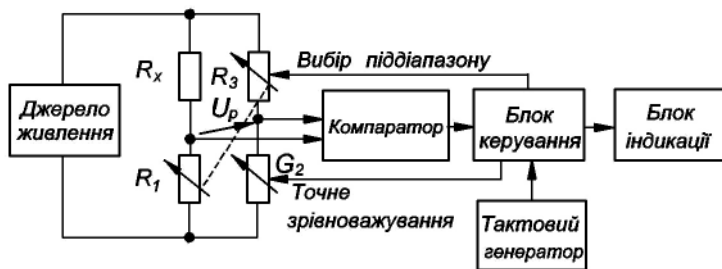


Рис. 14.29. Структурна схема цифрового моста постійного струму

Умовами врівноважування такого моста є такі: $R_x = R_1 R_3 / R_2 = R_1 R_3 G_2$.

Два протилежних плеча моста R_1 та R_3 призначені для змінювання під діапазонів вимірювань і являють собою набори послідовно або паралельно ввімкнутих резисторів. Вони комутуються за допомогою ключів, електронних або електромеханічних, сигналами блока керування, які формуються з імпульсів тактового генератора. Магазин провідностей G_2 забезпечує лінійну залежність опору від регульованого параметра моста.

Автоматичне зрівноважування мостової схеми виконується за два етапи: на першому відбувається вибір піддіапазону вимірювання за допомогою резисторів R_1 та R_3 , а на другому — точне зрівноважування за допомогою перетворювача код-провідність G_2 . Змінювання значень провідності має направлений характер, від більших до менших значень провідності, що спрощує алгоритм зрівноважування. Напрямок змінювання вагових провідностей всередині кожної декади визначається компаратором за знаком напруги розбалансу U_p на вимірювальній діагоналі мостової схеми. Алгоритм зрівноважування задається блоком керування. Процес зрівноважування завершується при виконанні умови зрівноважування моста $R_x = R_1 R_3 G_2$, з похибкою, обумовленою чутливістю компаратора. При цьому ввімкнутими будуть ті провідності перетворювачів код-провідність G_2 , які визначають значення опору R_x . Замкнутим ключам перетворювачів код-провідність відповідає певний код, який вводиться в блок індикації для цифрового відліку результату вимірювання. Положення коми на табло залежить від вибраного піддіапазону вимірювань.

Цифрові відсоткові мости належать до класу мостів вузького діапазону і є різновидом розглянутих раніше мостів для вимірювання значень опору (рис. 14.29). Перша відмінність полягає у тому, що провідність G_2 виконується у вигляді двох складових: постійної та змінної, яка регулюється при врівноважуванні моста. Друга ж зводиться до того, що перед початком вимірювань в одному з плечей мосту (R_1 або R_3) установлюється зразковий опір, що дорівнює номінальному значенню $R_{\text{хном}}$, відносно якого визначається відсоткове відхилення дійсного виміряного значення опору R_x . Для цього використовують зовнішню або внутрішню міру опору (магазин опору). Значно складнішими у порівнянні з аналоговими є цифрові мости змінного струму. Це пов'язано з необхідністю зрівноважування мостової схеми при вимірюванні комплексних опорів регулювання двох параметрів, що призводять до ускладнення алгоритму зрівноважування та схеми моста. Разом з тим вимірювальні схеми цифрових мостів мають той самий вигляд і умови зрівноважування, що й для аналогових мостів змінного струму. Відмінність полягає в автоматизації зрівноважування, що призводить до різних принципів побудови залежно від алгоритму зрівноважування. До **цифрових** методів вимірювання опору належать **прямі** та **порівняння**. В основі перших лежить перетворення опору (або інших зосереджених параметрів електричних кіл) у проміжну величину (постійна напруга), зручну для подальшого вимірювання цифровими методами. В одній із простих **прямих** схем вимірювання активного опору відбувається перетворення його у постійну напругу за допомогою подільника напруги та операційного підсилювача. Така схема відрізняється від аналогової тільки тим, що замість аналогових електронних вольтметрів застосовуються цифрові вольтметри (рис. 14.30).

На виходах подільників напруги у схемах (рис. 14.19, а, б) утворюється відповідна постійна напруга:

$$U_{x1} = (U/(R_0 + R_x))R_x; \quad (14.28)$$

$$U_{x2} = (U/(R_0 + R_x))R_0. \quad (14.29)$$

Схему а рекомендується використовувати за умови $R_x \ll R_{\text{вх}}$, де $R_{\text{вх}}$ — вхідний опір цифрового вольтметра, схему б якщо ця умова не виконується. Напруги U_{x1} , U_{x2} вимірюються цифровим вольтметром, показання якого нелінійно залежать від вимірюваного опору R_x , що ускладнює градування вимірювача в одиницях опору.

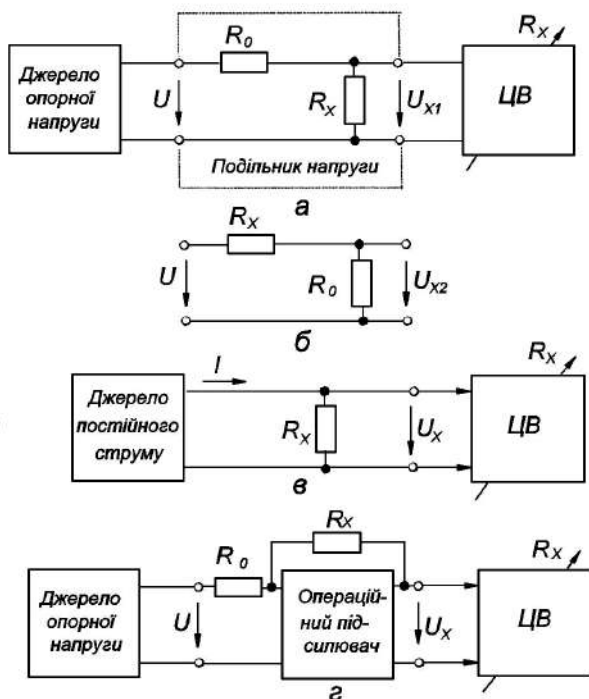


Рис. 14.30. Схеми вимірювання активного опору: а, б – з джерелом опорної напруги; в – з джерелом постійного струму; г – з операційним підсилювачем

Цього дозволяє позбутись схема в, в якій спад напруги U_x на опори R_x створюється постійним струмом I від джерела струму. Тоді $U_x = IR_x$, і показання цифрового вольтметра є пропорційними вимірюваному опору R_x . Але і в цій схемі із зростанням опору R_x порушується лінійна залежність U_x від R_x . Найбільш досконалими є схеми вимірювання опору R_x на основі операційних підсилювачів, одним із прикладів яких є схема г. Зразковий опір, як правило, виконується багатосекційним для змінювання границь вимірювання R_x . Така схема забезпечує досить високу точність при вимірюванні опору в діапазоні від одиниць до 10^7 Ом. До методів **прямих** вимірювань належить також **час-імпульсний метод**, який, як і попередній, теж набув широкого застосування. Він передбачає проміжне перетворення одного з вимірюваних параметрів (наприклад, опору) у пропорційний інтервал часу, який потім вимірюють методом дискретної лічби.

Характерною ознакою є формування розгортальної напруги, яку одержують створюючи режим перехідних процесів в аперіодичних колах

R_c та R_L при вмиканні їх до джерела постійної опорної напруги або при відмиканні від нього. Між наперед визначеними миттєвими значеннями цієї напруги виділяють інтервал часу, який виявляється пропорційним сталій часу кола, а відповідно, і вимірюваному параметру. При вимірюванні опору R зразковим повинен бути конденсатор C і, навпаки, при вимірюванні ємності у цій схемі зразковим повинен бути резистор. Структурна схема час-імпульсного вимірювача параметрів опору, ємності та індуктивності наведена на рис. 14.31, їх характеристики у додатку 32[194–201], а вигляд сучасних приладів наведено на рис. 14.32 та 14.33.

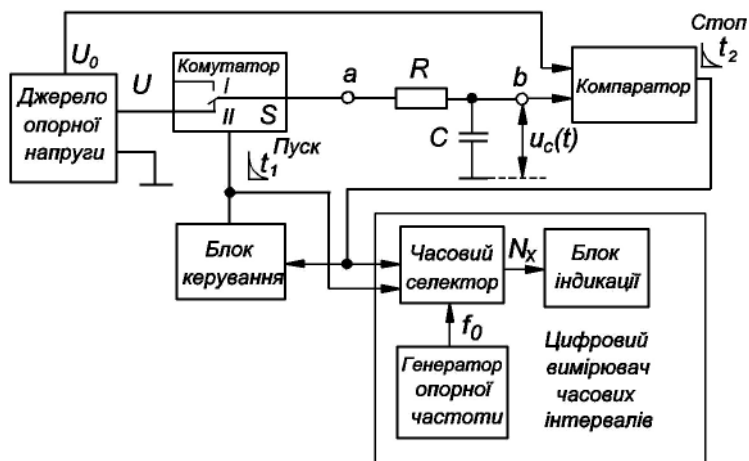


Рис. 14.31. Схема час-імпульсного вимірювача параметрів опору, ємності та індуктивності



Рис. 14.32. Вимірювач імпедансу Е7-20[194, 195]



Рис. 14.33. Професійний LCR-метр DT-9930[196]

Вимірювачі опору заземлення

Для вимірювання опору заземлення електротехнічного обладнання застосовують прилади типу МС-08, принципова електрична схема якого наведена на рис. 14.34., а зовнішній вигляд на рис. 14.35[202]

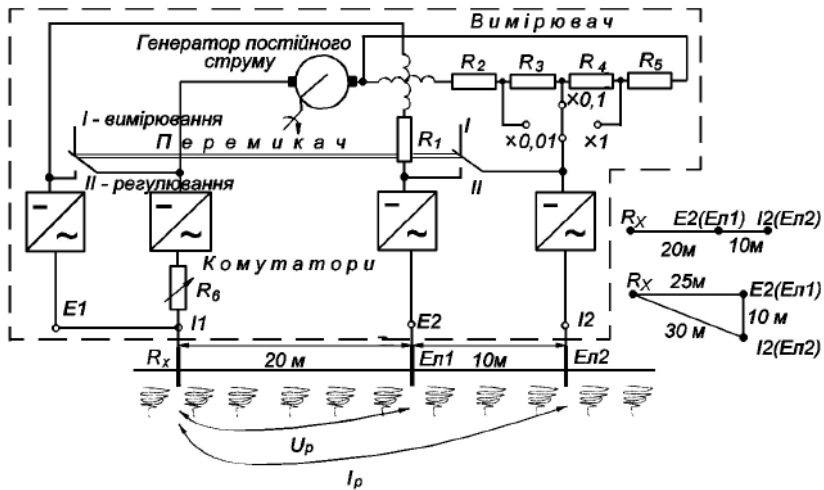


Рис. 14.34. Схема вимірювача опору заземлення: R_x – вимірюваний опір; Ел1, Ел2 – допоміжні електроди; R_6 – регулювальний реостат

Для вимірювання опору заземлення використовують два допоміжні електроди Ел1 та Ел2 (сталеві труби або стрижні діаметром не менше 5 мм), які забивають у землю на глибину понад 0,5 м на заданих відстанях від вимірюваного опору R_x . Комутатори ввімкнені в схему так, що у зовнішньому

колі (земля) протікає змінний струм, а в рамках логометра — постійний струм. Схема приладу побудована так, що обмотка в колі I_1 , I_2 (мала рамка) увімкнута як амперметр, а обмотка у колі E_1 та E_2 (велика рамка) — як вольтметр. За такою схемою вмикання показання логометра пропорційні опору заземлення, шкала якого проградуйована в [Ом].



Рис. 14.35. Зовнішній вигляд МС-08[202]

Перед вимірюванням, після забивання електродів Ел1 та Ел2, приєднання їх до виводів вимірювача I_1 , I_2 , E_2 , здійснюють компенсацію опору електродів за допомогою регульовального реостату R_0 . Для цього перемикач вимірювання — регулювання встановлюють у позицію регулювання та зміною опору R_0 добиваються встановлення стрілки вимірювача навпроти червоної риски. Після цього виконують вимірювання опору заземлення R_x , починаючи з шкали «х1». При вимірюваннях прилад потрібно розташовувати близько до заземлювача R_x , а виводи E_1 та I_1 з'єднують між собою. Основна відносна похибка цих вимірювань у межах 0–1 000 Ом дорівнює $\pm 10\%$.

У теперішній час світовою радіотехнічною промисловістю випускається велика номенклатура цифрових приладів для вимірювання опору заземлення, зображення одного з них наведено на рис. 14.36[203], а характеристики кількох у додатку 33[204–209].



Рис. 14.36. Вимірювач опору заземлення UNI-T UT522[203]

Вимірювання частоти електричних коливань

Загальновідомо, що наслідки ураження людини електричним струмом не в останню чергу залежать від частоти електричних коливань. Так, найбільш небезпечними для людини є струм з частотою від 20 до 200 Гц. При збільшенні останньої небезпека для людини зменшується і цілком зникає в інтервалі 450–500 кГц, зберігаючи небезпеку опіків. Тому вимірювання частоти електричного струму є важливою вимірювальною задачею не тільки в електротехніці, але і в охороні праці. У сучасній техніці використовують дуже широкий діапазон частот електричних коливань — від дрібних часток до 10^9 Гц. Частота може бути виміряна методами безпосередньої оцінки або порівняння (осцилографічний) та цифровими методами.

Вибір методу вимірювання визначається діапазоном частот, потрібною точністю і часом одержання результату вимірювання. Сучасні методи дозволяють вимірювати частоту з основною відносною похибкою від ± 1 – $2,5$ до $\pm 10^{-11}\%$.

Аналогові методи безпосередньої оцінки проводять з використанням логометричних електродинамічних та феродинамічних вимірювальних механізмів і застосовують для вимірювання промислових частот. Принципова схема електродинамічного частотоміра наведена на рис. 14.37.

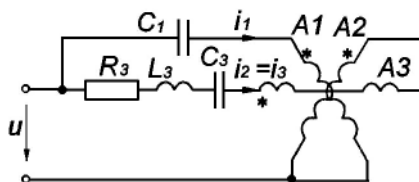


Рис. 14.37. Схема електродинамічного частотоміра $A3$ – нерухома котушка; $A1, A2$ – рухомі котушки; $C1$ – конденсатор

Послідовно з котушкою $A1$ вмикається конденсатор $C1$, ємність якого така, що струм у цій котушці випереджує напругу u на 90° . У зв'язку з тим, що при резонансній частоті струми i_1 та i_2 зсунуті за фазою на 90° , оборотний момент M_{o61} , що діє на котушку $A1$, дорівнює нулю. Під дією оборотного моменту M_{o62} , що діє на котушку $A2$, рухома частина приладу буде переміщуватись доти, поки котушка $A1$ не займе положення, в якому її площа буде збігатись з площиною нерухомої котушки $A3$. У цьому положенні оборотний момент M_{o62} дорівнює нулю. Це положення рухомої частини приладу береться за початкове. Вказівник показувального пристрою

розташовують так, щоб він знаходився над середньою позначкою шкали. При відхиленні значення вимірюваної частоти від резонансної кут між векторами струмів i_1 та i_2 стає більшим або меншим 90° , а момент M_{o61} не дорівнює нулю. Внаслідок його дії рухома частина приладу відхиляється від початкового значення, що приведе до виникнення моменту M_{o62} , спрямованого назустріч моменту M_{o61} . Рухома частина буде повертатись до виконання умови $|M_{o61}| = |M_{o62}|$.

Електродинамічні частотоміри мають наступні межі вимірювання: 45–55; 350–450; 450–550; 900–1100; 1350–1650 Гц. Клас їх точності — від 0,5–2,5, зображення одного з них наведено на рис. 14.38[210], а характеристики у додатку 34[210, 212].



Рис. 14.38. Частотомір щитовий аналоговий змінного струму ЭД2230[210].

У діапазоні частот від 10 до 0,5–1 МГц застосовують **конденсаторні частотоміри**. В них використовують перетворювачі частоти в напругу(-струм) принцип дії яких полягає в заряджанні чи розряджанні конденсатора. Основна відносна похибка вимірюваної частоти не перевищує $\pm 2\%$. Спрощена принципова схема наведена на рис. 14.39, вигляд приладу на рис. 14.40[213], а характеристики у додатку 34[214, 215].

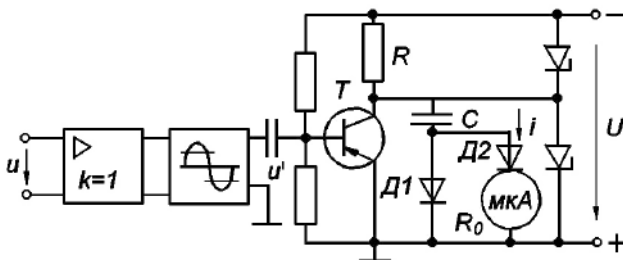


Рис. 14.39. Принципова схема конденсаторного частотоміра



Рис. 14.40. Конденсаторний частотомір Ф5043[213]

Сутність **осцилографічного методу** полягає у порівнянні невідомої частоти із зразковою за допомогою осцилографа.

Цифрові (електронно-лічильні) частотоміри складають поряд з цифровими вольтметрами найбільш чисельну і досконалу групу цифрових вимірювальних приладів. До неї входять власне електронно-лічильні та мікропроцесорні частотоміри.

Електронно-лічильні частотоміри виконуються універсальними і вимірюють частоту, період електричних сигналів, суму і різницю двох частот, інтервали часу, а також використовуються як лічильники імпульсів. Залежно від діапазону вимірюваних частот — низьких (до 100 Гц) або високих (більше 100 Гц) ці прилади вимірюють період або частоту сигналів. З цієї причини частотоміри мають два канали вимірювання: один для частоти, а інший періоду та інтервалу часу. Канали є функціонально пов'язаними та утворюють єдину вимірювальну структуру, в якій більшість блоків є спільними. Структурна схема електронно-лічильного частотоміра середніх значень наведена на рис. 14.41. Зображення одного з таких приладів — ЧЗ-54, наведено на рис. 14.42[217], а характеристики кількох у додатку 34[216–219].

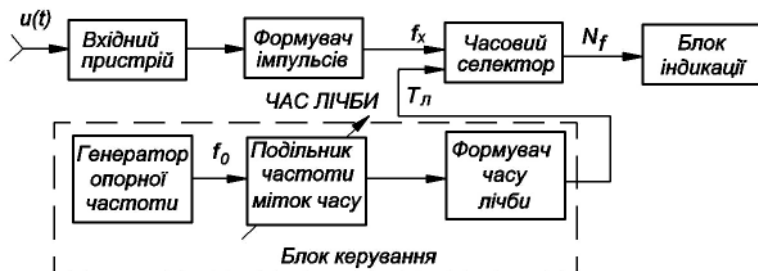


Рис. 14.41. Структурна схема електронно-лічильного частотоміра середніх значень



Рис. 14.42. Електронно-лічильний частотомір ЧЗ-54[217]

Вимірюваний сигнал $u(t)$ частотою f_x через вхідний пристрій подається на формувач імпульсів, який у моменти переходу напруги $u(t)$ через одне з нульових значень генерує імпульси з періодом $T_x = 1/f_x$. Ці імпульси надходять на один із входів часового селектора, але у початковому положенні вони через нього не проходять. У режимі вимірювання блок керування подає на інший вхід часового селектора керуючий сигнал тривалістю T_d , яким селектор відкривається. Протягом цього часу імпульси вимірюваної частоти f_x надходять до блока індикації, де вони обліковуються, а їх число N_f як результат вимірювання, відображається на цифровому пристрої. Для завдання часу лічби T_d призначені генератор опорної частоти f_0 , подільник частоти відміток часу і формувач часу лічби T_d . Як правило, передбачається кілька значень часу лічби, їх залежно від вибраного піддіапазону вимірювань встановлюють перемикачем «час лічби» на панелі приладу. Блок керування, крім формування часу лічби, слугує для задання розрядності, одиниці вимірювання, тривалості індикації і скидання показань блока індикації в нуль.

Для вимірювання частоти промислових електричних мереж з номінальною частотою 50 Гц на підприємствах, які виробляють та споживають електричну енергію застосовують щитові електронні частотоміри (рис. 14.43[220]), їх порівняльні характеристики наведені у додатку 34 [220–223].



Рис. 14.43. Щитовий частотомір ЩЦ 120[220]

Мікропроцесорні частотоміри можуть працювати зі змінними блоками, які забезпечують розширення їх функціональних можливостей і частотного діапазону, мають вихід на канал загального користування для з'єднання з іншими системними приладами. Застосування мікропроцесорів дозволило автоматизувати введення програм роботи залежно від вимірюваної величини і управління процесом вимірювання, виконання окремих вимірювальних і обчислювальних операцій, статистичне усереднення результатів вимірювань, а також проводити контроль працездатності і калібрування, корекцію результатів вимірювань та відображення їх у зручній формі, керування інтерфейсом. Вимірювання всіх величин у частотомірах цього типу проводиться за методом дискретної лічби. Структурна схема мікропроцесорного частотоміра наведена на рис. 14.44.

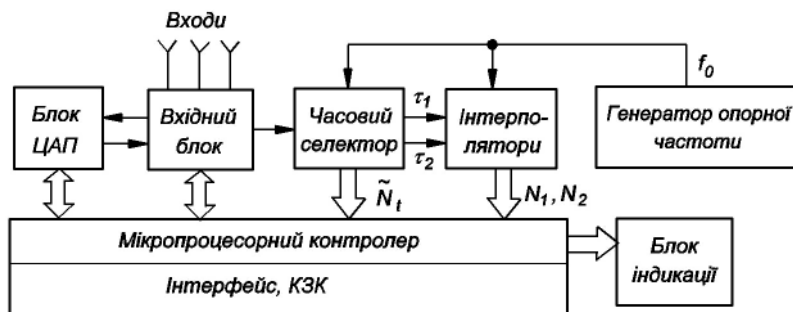


Рис. 14.44. Структурна схема мікропроцесорного частотоміра

Вхідний блок має кілька входів і призначається для посилення, формування і ділення частоти вхідних сигналів, комутації кіл керування тощо. Часовий селектор служить для формування вимірюваного інтервалу часу t_x , що дорівнює цілому числу періодів досліджуваного сигналу при вимірюванні частоти та періоду і вимірювання його методом дискретної лічби, а також для виділення інтервалів часу τ_1, τ_2 і формування прямокутних імпульсів тієї самої тривалості, які надходять до двоканального інтерполятора. Числовий еквівалент $\tilde{N}_t$ інтервалу часу t_x , який дорівнює $\tilde{N}_t = \text{ent}[t_x / T_0]$, подається у мікропроцесорний контролер і запам'ятовується у ньому. В інтерполяторі відбувається розширення інтервалів τ_1, τ_2 у k_t раз (наприклад, у частотомірі ЧЗ-64[224] $k_t = 128$) і вимірювання розширених інтервалів $k_t \tau_1, k_t \tau_2$ за методом дискретної лічби. З інтерполятора вони надходять до мікропроцесорного контролера, де алгебраїчно підсумовуються з записаним раніше значенням $\tilde{N}_t$:

$$N_i = \tilde{N}_i + N_{i-} - N_{i-} \quad (14.30)$$

Блок ЦАП призначений для вимірювання, формування і видачі напруги запуску на формувач імпульсів вхідного блока приладу. У дистанційному режимі рівень запуску програмується через канал загального користування. Калібрування виконується за підпрограмою, яка задається у ручному режимі або автоматично після вмикання приладу.

Мікропроцесорний контролер призначається для керування процесом вимірювання і обчислення результату вимірювання з урахуванням поправок. Він містить керуючий обчислюваний пристрій, оперативний і програмований запам'ятовуючі пристрої, блок керування і інтерфейс. Працює останній у двох режимах — приймання та передавання інформації. Швидкість обміну даними через нього коливається у межах від 100 до 1 000 байт/с. Зображення мікропроцесорного частотоміра наведено на рис. 14.45[225], а їх деякі характеристики кількох типових приладів цього типу у додатку 34[225–230].



Рис. 14.45. Мікропроцесорний частотомір CNT-90[225]

Контрольні запитання

1. Поясніть, яким чином здійснюється нормування електричних, магнітних та електромагнітних полів (назвати основні одиниці, які при цьому використовують).
2. Назвіть основні одиниці вимірювань, які використовують при дослідженнях електромагнітних полів?
3. У чому лежить принцип дії приладів для вимірювання електромагнітних випромінювань?
4. На які типи поділяють прилади, які використовують для вимірювання параметрів електричного струму?

5. Яким чином позначають аналогові електромеханічні вимірювальні прилади?
6. Яким чином позначають цифрові вимірювальні прилади?
7. У чому полягає основна особливість цифрових вимірювальних приладів?
8. З якою метою застосовують масштабні вимірювальні перетворювачі?
9. Наведіть принцип дії та застосування магнітоелектричних приладів.
10. Вкажіть принцип дії та застосування електромагнітних приладів.
11. Наведіть принцип дії та застосування електродинамічних приладів.
12. Вкажіть принцип дії та застосування феродинамічних приладів.
13. Назвіть основні типи електронних вольтметрів.
14. Які методи перетворення найбільш часто використовують у сучасних цифрових вольтметрах постійної напруги?
15. Які ви знаєте основні відмінності у принципі побудови класичних цифрових вольтметрів змінної напруги?
16. Назвіть аналогові та цифрові методи вимірювання активного опору.
17. У чому полягає сутність аналогових методів вимірювання частоти електричного струму?
18. У чому полягає відмінність цифрових методів частоти електричного струму від аналогових?

ДОДАТОК 1. Термопары для вимірювання високих температур[6]

№ з/п	Термопара	Хімічний склад термоелектродних сплавів		Робочі атмосфери				Максимальна робоча температура		Чутливість	
		Позитивний електрод	Негативний електрод	Окислювальна	Відновлювальна	Інертна	Вакуум	Привалний час	короткочасно	$t, ^\circ\text{C}$	$dE/dt, \text{мкВ}/^\circ\text{C}$
1	Мідь- конпель; мідь- константан	Cu	Cu + (40-45) Ni + Mn + (Fe)	++	+	+	+	400	600	0-400	40-60
2	Залізо – константан	Fe	Cu + (40-45) Ni + Mn + Fe	++	++	+	+	750	1100	0-1100	50-64
3	Хромель – конпель; хромель – константан	Ni + 9,5 Cr	Cu + (40-45) Ni + Mn + (Fe)	++	-	+	+	800	1100	0-1100	64-88 58-81
4	Хромель-алюмель	Ni + 9,5 Cr	Ni + 1Si + 2Al + 2,5 Mn	++	-	+	+	1100	1300	0-1300	35-42
5	Силіх – силін, Тофель-2- ніаль-2	Ni + 9,5 Cr+ Si + (Nb)	Ni + 2,5 Si	++	+	+	+	1200	1300	200-1300	35-42
6	Жеміноль, ЦНІІЧМ-2	Ni + 20Cr + 1Si + 1Nb	Ni + (2,5-3) Si + (1,5Al)	++	+	+	+	1200	1300	500-1300	32-40
7	Нікросил-неспл	Ni + 14,2Cr + 1,4Si	Ni + 4,4 Si + 0,1Mg	++	-	+	+	1200	1300	0-1300	26-36
8	20-19	Ni + 18Mo	Ni + 1Co	-	H ₂ ++	+	+	1200	1300	600-1200	59
9	НК-СА	Ni + 17Co + 2Al + 2Mn + Si	Ni + 3,5 Al + 1,5Mn + 1Si	++	-	+	+	1000	1200	500-1000	20
10	Фенікс (НІС-16)	Fe + 27Cr + 5,5 Al	Ni + 3Si +1,5Al	++	+	+	+	1200	1300	400-1300	20-30
11	НЖ-СК	-	-	++	-	+	+	600	900	400-900	40-60
12	ППЗ – ЗП (платинель)	Pd + 31Pt + 14Au	Au + 35 Pd	++	H ₂ +	+	+	1300	1350	600-1300	45-33
13	ППР-ПЗП	Pt + 38Pd + 5Rh	Rd + 37 Au + 8Pt	++	H ₂ +	+	+	1400	1450	600 – 1400	41-47
14	ПІП	Pt + 15Ir	Pd	++	-	+	-	1200	1400	1000-1400	40-47
15	Палатлат, паладор та інші.	Pt + (5-10) Rh або Ir	Au + (30-45) Pd	++	-	+	-	1200	1300	800-1200	51-63

Продовження ДОДАТКА 1.

№	Термопара	Хімічний склад термоелектродних сплавів		Робочі атмосфери				Максимальна робоча температура		Чутливість	
		Позитивний електрод	Негативний електрод	окислювальна	відновлювальна	інертна	вакуум	Тривалий час	короткочасно	$t, ^\circ\text{C}$	$dE/dt, \text{мкВ}/^\circ\text{C}$
16	ПР10/0; ПР13/0	Pt + 10Rh; Pt + 13 Rh	Pt	++	-	+	+	1400	1600	600–1600	10–14
17	ПР30/6; ПР20/5	Pt + 30Rh; Pt + 20Rh	Pt + 6 Rh; Pt + 5 Rh	++	+	+	+	1600	1800	1000–1800	8–12
18	ПР40/20	Pt + 40 Rh	Pt + 20Rh Ir	++	-	+	+	1700	1850	1000–1800	3–4,5
19	ПР40/0; ПР50/0; ПР60/0	Ir + 40 Rh; Ir + 50 Rh; Ir + 60 Rh	Ir	++	-	++	+	-	2200	1000–2100	5,5–6,5
20	ПР50 – IP10	Ir + 50 Rh	Ir + 10 Ru	++		++	+	-	2200	1000–2100	9–18
21	ВМ	W	Mo	-	H ₂ +	++	++	-	2400	1400–2400	6,5–8
22	ЦНИИЧ-1;	W	Mo + 0,5 Al	-	H ₂ +	+	++	2300	2400	1300–2400	10
23	БР5/20; ВАР5/20	W + 5 Re	W + 20Re	-	H ₂ +	++	++	2300	3000	1300–2500	14–7
24	БР10/20	W + 10 Re	W + 20Re	-	H ₂ +	+	+	2300	3000	1300–2500	9–5
25	ВАР3-БР25; ВАР5-БР26	W + 3Re; W + 5Re	W + 25Re W + 26Re	-	H ₂ +	+	+	2300	3000	1300–2500	18–8

Примітка. ++ — рекомендована робоча атмосфера; + — експлуатація у цій атмосфері є можливою; — використовувати атмосферу не рекомендується.

ДОДАТОК 2. Термопары для вимірювання низьких температур[6]

№	Термопара	Хімічний склад термоелектродних сплавів		Діапазон температур, К	Чутливість, мкВ/К
		Позитивний електрод	Негативний електрод		
1	Мідь — копель; мідь — константан	Cu	Cu + (40–45)Ni + Mn + (Fe)	40–300 70–300	12–45 10–40
2	Залізо — константан	Fe	Cu + (40–45)Ni + Mn + (Fe)	70–300	21–51
3	Хромель — копель; хромель — константан	Ni+9,5 Cr	Cu + (40–45)Ni + Mn + (Fe)	20–300 20–300	9,5–65 8,5–60
4	Хромель — алюмель	Ni + 9,5 Cr	Ni + 1Si + 2Al + 2,5 Mn	40–300	8,5–40
5	Мідь– 3Ж	Cu	Au + (0,02–0,07)Fe	1–60	9–15
6	НС–3Ж	Ag + 0,37 Au	Au + (0,02–0,07)Fe	1–60	9–15
7	Хромель — 3Ж	Ni + 9,5 Cr	Au + (0,02–0,07)Fe	1–300	9–23
8	Мідь — 3Ж	Cu	Au + 2,1 Co	10–300	9–43
9	НС — 3Ж	Ag + 0,37 Au	Au + 2,1 Co	10–300	9–43
10	Хромель — 3Ж	Ni + 9,5 Cr	Au + 2,1 Co	0–300	11–63
11	Мідь — МЖ	Cu	Cu + 0,1Fe	2–160	9–16
12	Хромель — МЖ	Ni + 9,5 Cr	Cu + 0,1Fe	2–300	9–16

ДОДАТОК 3. Сучасні тепловізори[18–24]

№ з/п	Назва та тип	Фірма – виготовлювач, країна	Розрішення матриці, пікселі	Поле зору, град	Збіль- шення, рази	Діапазон вимірювання дистанції, м	Діапазон вимірюємих температур, °C	Ціна, грн
1	Pulsar-Quantum-Lite-xq23V[18]	ULIS, Франція	384x288	16,5x12,4	1,8–7,2	3–800	–25...+50	35 280
2	TMR-42[19]	TMR, Україна	384x288	10,5x8,2	3–6–12	20–1 500	–25...+65	136 400
3	Prometheus 640 2–16x50 (30Hz) [20]	Armasight, США	800x600	-	1,8–2,1	-	–40...+50	261 375
4	Fluke TTR [21]	Fluke, США	160x120	22,5(r)x310(в)	-	-	–20...+150	37 500
5	Fluke TI 125 [21]	Fluke, США	160x120	22,5(r)x310(в)	-	-	–20...+350	112 000
6	Fluke TI 95 [21]	Fluke, США	80x80	260x260	-	-	–20...+250	75 000
7	Flir E4[22]	FLIR «Systems», США	80x60	45x34	-	-	–20...+250	47 580
8	Flir E5[22]	FLIR «Systems», США	120x90	45x34	-	-	–20...+250	54 600
9	Flir E5XT[22]	FLIR «Systems», США	160x120	45x34	-	-	–20...+400	47 000
10	Flir E6[22]	FLIR «Systems», США	160x120	45x34	-	-	–20...+250	73 410
11	Flir E8[22]	FLIR «Systems», США	320x240	45x34	-	-	–20...+250	110 112
12	Testo 865 [23]	Testo, ФРН	120x160	31x23	-	-	–20...+280	38 955
13	Testo 872 [24]	Testo, ФРН	320x240	42x30	-	-	–30...+650	118 462

ДОДАТОК 4. Термохімічні індикаторні олівці[1]

Марка Олівця	Початковий колір	Температура переходу, °С.	Колір після дії температури
110	Жовтий	130	Оранжевий
240	Бірюзовий	240	Білий
250	Зелений	250	Світло-коричневий
300	Охристий	300	Червоно-коричневий
380	Блідо-зелений	380	Сірий через світло-коричневий
400	Білий	400	Світло-коричневий через біжевий
410	Голубий	410	Світло-бежевий через сірий
470	Синьо-зелений	410	Білий через темно-зелений

ДОДАТОК 5. Термохімічні індикаторні порошки[1]

Назва	Формула	Початковий колір	Температура переходу, °С	Колір після дії температури
Тетраіодомеркуроат Срібла	$\text{Ag}_2[\text{HgI}_4]$	Яскраво-жовтий	45±5	Помаранчевий
			95±5	Кармінно-червоний
Тетраіодомеркуроат Міді	$\text{Cu}_2[\text{HgI}_4]$	Яскраво-червоний	70±5	Коричневий
			85±5	Чорний
Іодид свинцю	PbI_2	Жовтий	230	Червоно-помаранчевий
			250	Червоний
			360	Червоно-ліловий
Сульфид ртуті	HgS	Яскраво-червоний	250 320	Кавовий Чорний
Окис ртуті червоний	HgO	Червоний	356	Чорний

ДОДАТОК 6. Сучасні газоаналізатори[36]

№ з/п	Назва та тип	Принцип дії	Фірма – виготовлювач, країна	Визначуваний компонент	Діапазони вимірювань	Границі дозованих похибок
1	Газоаналізатори з пристроєм пробовідбору ГИАМ-10М1	інфрачервоні, недисперсні	ПО «Аналітприбор», м.Смоленськ, Росія	CO NO SO ₂	0–5; 0–15 г/м ³ 0–1; 0–2 г/м ³ 0–10; 0–20 г/м ³	$\gamma = \pm 10\%$
2	Газовизначники хімічні, промислових викидів ГХПВ-2	лінійно-коліристичні	МП «СЕРВЭК», м.Санкт-Петербург, Росія	NH ₃ H ₂ S	0,01–1,5 г/м ³ 0,02–1,0 г/м ³	$\delta = \pm 25\%$
3	Прилади оптичні стаціонарні ФГОЗ–1	Оптичний	СКБ САТ, м.Ужгород, Україна	NO	0–0,1г/м ³ 1,0–2,0 г/м ³	$\Delta = \pm 0,1\text{г/м}^3$ $\delta = \pm 10\%$
4	Аналізатори електрохімічні стаціонарні ГАЗОТЕСТ	електрохімічний	АО «Полігаз плюс», м.Москва, Росія	CO SO ₂ O ₂ NO NO ₂	0–300–1000 ppm 0–400–1000 ppm 0–5–21% 0–250–400 ppm 0–30–150 ppm	$\Delta = \pm 30 \text{ ppm}$, $\delta = \pm 20\%$ $\Delta = \pm 40 \text{ ppm}$, $\delta = \pm 10\%$ $\delta = \pm 0,2–0,4\%$ $\Delta = \pm 25 \text{ ppm}$, $\delta = \pm 10\%$ $\Delta = \pm 6 \text{ ppm}$, $\delta = \pm 20\%$
5	Газоаналізатор хемолюмінесцентний, стаціонарний КЛЕН -2М-02.05	хемолюмінесценція	МТП – «ТАНЕК», м.Москва, Росія	NO _x	0–200–1000 мг/м ³	$\gamma = \pm 12\%$
6	Газоаналізатор окислів азоту «ЭНОМЕТР»	фотоколориметричний	МНВП «Техноприбор», Раменское, Моск. обл., Росія	NO	0,1–2 г/м ³	$\delta = \pm 13\%$

Продовження ДОДАТКА 6

№ з/п	Назва та тип	Принцип дії	Фірма – виготовлювач, країна	Визна- чуваний компонент	Діапазони вимірювань	Границі дозволених похибок
7	Газоаналізатор теплофізичний, переносний для вимірювання вмісту кисню у двокомпонентних газових сумішах та у димових газах TMO2-TC	теплопроводність	Ірландія, США, фірма «Rapametrics Limited»	N ₂ , He, CO ₂ , SO ₂	0–1, 0–2, 0–10, 0–25, 0–50, 0–100% 80–100%	$\gamma = \pm (2-10) \%$
8	TMO2-D	магнітний	Ірландія, США, фірма «Rapametrics Limited»	O ₂	0–1, 0–2, 0–5 0–10, 0–21, 0–25, 0–50, 0–100, 96–100%	$\gamma = \pm (2-10) \%$
9	Газоаналізатори оптичні стаціонарні	Оптичний	Німеччина, фірма «Erwin Sick GmbH Optik Elektronik»	CO ₂ H ₂ O	0–25–100% 0–25–100%	$\gamma = \pm 5\%$ $\delta = \pm 5\%$
10	Аналізатори CO інфрачервоні моделі 5 100 та 5 100A	інфрачервоний	Ірландія, США, фірма «Fisher Rosemount»	CO	0–200 ppm 0–10000 ppm	$\Delta = \pm 20 \text{ ppm}$ $\delta = \pm 6\%$

ДОДАТОК 7. Сучасні хромато- мас-спектрометри[36]

Назва	Фірма –виготовлювач, країна, тип	Принципи дії та метрологічні характеристики	Значення метрологічних характеристик
Хромато-масспектрометри для екологічних та токсикологічних характеристик газоподібних, рідких та твердих речовин	Фірма «Bruker Analytik GmbH», ФРН, ESQUIRE.	Діапазон мас (базове виконання) (можливе розширення) Межа похибки за шкалою мас. Максимальне розрішення (на рівні 10% від висоти піку), не більше. Максимальна швидкість сканування	50–2 000 а.о.м. 100–34 000 а.о.м. $\Delta = \pm 0,2$ а.о.м. 0,2 а.о.м. 13 000 а.о.м./с
Хромато-масспектрометри для екологічних та токсикологічних досліджень, контролю фізико-хімічних характеристик газоподібних, рідких та твердих речовин, проведення судово-медичних експериментів	Фірма «Finnigan MAT», США, SSQ/TSQ 7000	Діапазон мас: мод. SSQ мод. TSQ Швидкість сканування	10–2 500 а.о.м. 100–4 000 а.о.м 4 000 а.о.м/с

ДОДАТОК 8. Сучасні аналізатори пилу[36]

Назва, призначення	Тип, фірма – виготовлювач, країна,	Принцип дії	Призначення	Діапазони вимірювань	Межі дозволених похибок
Димомір оптичний для контролю димності транспортних засобів	ДЮ-1 МЗ ім. Вавілова, Беларусь	оптичний	димність (коєфіцієнт ослаблення)	0–100%	$\gamma = \pm 2,5\%$
Аналізатори пилу у промислових викидах: інфрачервоні, оптичні, стаціонарні	FW 56-P, фірма «Erwin Sick GmbH Optik Electronic», ФРН	оптичний інфрачервоний	масова концентрація пилу	0–20мг/м³ 20–100г/см³	Не нормується $\delta = \pm 20\%$
Аналізатори пилу для контролю промислових викидів: гравіметричні, переносні	GRAVIMAT 500 (мод. 501 та 502), фірма «Erwin Sick GmbH Optik Electronic», ФРН	Гравіметричний	масова концентрація пилу	0,1–200 мг/м³ 50– 50000мг/м³	$\delta = \pm 10\%$ $\delta = \pm 8\%$
Аналізатори пилу у атмосферному повітрі: радіоізотопні стрічкові	MR101P, фірма «Environnement S.A.», Франція	радіоізотопний	масова концентрація пилу	0–100 0–200 100–2000 100–5000 100–10000	$\Delta = \pm 25\text{мкг/м}^3$ $\Delta = \pm 0,25 \text{ С}_{\text{х}} \text{ мкг/м}^3$
Вимірювачі димності стендові, оптичні для контролю димності відпрацьованих газів дизелів різного призначення	ІДС-1, НП МП «Екотест», Україна	оптичний	димність (коєфіцієнт послаблення)	0–100%	$\gamma = \pm 2,5\%$
Лічильник часток	Fluke 54–2, Fluke Industrial, США	оптичний	визначення кількості часток	Розмір часток 0,3–10 мкм	10% на 4 000 000 часток

ДОДАТОК 9. Порівняльні характеристики анемометрів[45–52]

Назва приладу, марка	Фірма, країна, виготовлення	Принцип дії	Діапазон вимірювань, м/с	Похибка вимірювань, м/с	Поріг чутливості, м/с	Примітка
Анемометр ручний чашковий з рахунковим механізмом MC-13[45]	HBO «Сигнал», Узбекистан,	Перетворення обертання в переміщення стрілок рахункового механізму	1–20	$\pm(0,3+0,05V)$	0,8	–
Анемометр ручний індукційний АРІ-49[45]	HBO «Сигнал», Узбекистан	Залежність між частотою обертання та силою магнітного потоку	2–30	$\pm(0,5+0,05V)$	1,5	–
Анемометр ручний з рахунковим механізмом АСО-3[45]	HBO «Сигнал», Узбекистан	Перетворення обертання в переміщення стрілок рахункового механізму	0,3–5	$\pm(1+0,06V)$	0,2	–
Анемометр переносний М-61[45]	HBO «Сигнал», Узбекистан	Перетворення обертання в переміщення стрілок рахункового механізму	1,5–40	$\pm(0,5+0,05V)$	1,0	–
Анемометр сигнальний М-95М-2 [45]	HBO «Сигнал», Узбекистан	Перетворення швидкості вітру в електричну напругу	2–50 2–25	$\pm(1+0,05V)$	1,5	–
Анемометр TENMARS TM-740 [46]	Tenmars Electronics, Тайвань	Перетворення швидкості вітру в електричну напругу	0,4–25	$\pm 2\%$	0,1	–
Анемометр WS-200-UMB [47]	G. LUFFT MESSUND REGELECHINI K GMBH, ФРН	Залежність швидкості розповсюдження ультразвуку від напрямку руху повітря	0–75	$\pm 0,3$ або $\pm 3\%$	–	Цифровий або аналоговий сигнал забезпечує миттєве, середнє, мінімальне або максимальне значення швидкості вітру.
Анемометр HX-WDS2E [48]	Tianjin International Trade Co, Китай	Залежність швидкості поширення ультразвуку від напрямку руху повітря	0–60	$\pm 3\%$	–	Виконаний з корозійно та ультрафіолетостійких матеріалів.

Продовження ДОДАТКА 9

Назва приладу, марка	Фірма, країна, виготовлення	Принцип дії	Діапазон вимірювань, м/с	Похибка вимірів, м/с	Поріг чутливості, м/с	Примітка
Лазерний анемометр Доплера ЛАД- 056 [49]	Інститут оптико-електронних інформаційних технологій, Росія	Ефект Доплера	Компонента Х,Y $\pm 0,01-30$ Компонента Z $\pm 0,01-100$	Компонента Х,Y $\pm 0,5$ Компонента Z $\pm 1,5$	-	Вимірювач включає в себе елементи пасивного аеродинамічного захисту зовнішніх оптичних поверхонь від пилу та атмосферного аерозолі
Testo 425 [50]	Testo, ФРН	Збільшення тепловитрат нагрітого тіла при зростанні швидкості обдування більш холодним газом	0-20	$\pm(0,03$ м/с $+5\%$ від вимірюваного значення	0,01	Вимірювання температури, швидкості і розрахунок об'ємної витрати, усереднення результатів вимірювань за часом і кількістю вимірів
LV 110 [51]	KIMO, Франція	Збільшення тепловитрат нагрітого тіла при зростанні швидкості обдування більш холодним газом	0,25-35	$\pm 3\%$ від вимірюваного значення $\pm 0,1$ м/с (в діап. 0,3-3 м/с); $\pm 1\%$ від вимірюваного значення $\pm 0,3$ м/с (в діап. 3,1-35 м/с)	0,01 (в діап. 0,3-3 м/с); 0,1 (в діап. 3,1-35 м/с)	Вимірювання швидкості руху повітря, напрямку, температури, об'ємної витрати, усереднення результатів, фіксація мін. та максимальних значень
TMA-21HV [52]	Amprobe, США	Збільшення тепловитрат нагрітого тіла при зростанні швидкості обдування більш холодним газом	0,1-30	$\pm 3\%$	0,01	Вимірювання швидкості руху та об'єму витрату повітря, температури, відносної вологості повітря, точки роси, фіксація мін., макс. та середніх значень

ДОДАТОК 10. Характеристики приладів для вимірювання вологості [53–59]

Назва приладу, марка	Фірма, країна, виготовлення	Діапазон вимірювань,		Похибка вимірів,		Поріг чутливості по відносній вологості, %	Примітка
		по температурі, °C	по вологості	по температурі, °C	по вологості, %		
Термогігрометр TENMARS TM-182 (EVM 182)[53]	Tenmars Electronics, Тайвань	20–60	1–99	$\pm 0,8$ (0–40) ± 2 (в інших випадках)	± 3 (20–80) ± 5 більше 80	0,1	Дисплей-рідиннокристальний, пам'ять 30 тис. знаків
Термогігрометр Xintest HT-350 [54]	Xintest, Китай	-30–100	0–100	$\pm 0,5$	± 2	0,01	Одночасна індикація на дисплеї температури та вологості
Термогігрометр Fluke-971 [54]	Fluke, США	20–60	5–95	+0,5	+2,5	-	Подвійний дисплей для відображення значень температури та вологості
Термогігрометр DC-803 [54]	DC, Китай	-50–90	10–99	± 1	± 5	1	Одночасна індикація на дисплеї температури та вологості
Термогігрометр Walkom HT-350 [55]	Walkom, Італія	-30–100	0–100	$\pm 0,5$ при 25 $\pm 0,8$ в інших випадках	± 2 при 25°C $\pm 2,5$ в інших випадках	0,01	Одночасна індикація на дисплеї температури та вологості
Термогігрометр Testo 608-H1 [56]	Testo, ФРН	0–50	10–95	± 3	$\pm 0,5$ при 25°C	0,1	Безперервне відображення температури, вологості та температури точки роси
Термогігрометр DIGITAL FY-12[57]	DIGITAL, Китай	-50–70	20–95	± 1	± 5	-	LCD-дисплей, виносний датчик

Продовження ДОДАТКА 10

Назва приладу, марка	Фірма, країна виготовлення	Діапазон вимірювань,		Похибка вимірів,		Поріг чутливості по відношенню вологості, %	Примітка
		по температурі, °C	по вологості	по температурі, °C	по вологості, %		
Цифровий Термогігрометр FLUS MT 903 MIN[58]	Flus Technology, Китай	-30–70	0–70	±2,5	±2,5%	0,1	Дісплей рідинно-кристалічний, відображення мін. та макс. значень
Портативний термогігрометр EZODO T4[59]	Ezo, Тайвань	-9,9–60	20–99	±1	±5 при 25°C	-	Вимірювання в режимі реального часу рівня вологості та температури
Термогігрометр DIGITAL FX-12[57]	DIGITAL, Китай	-50–70	20–95	±1	±5	-	LCD-дісплей, виносний датчик

ДОДАТОК 11. Точність вимірювань низького тиску залежно від діапазонів[60]

Діапазон тиску, мм рт. ст.	Відносна похибка вимірів приладів, % з індивідуальним градуюванням зразкових	
	0,1–1,0	0,02–0,5
$760-10^{-2}$		
$10^{-2}-10^{-6}$	1,0–5,0	1,00–3,0
$10^{-6}-10^{-8}$	5,0–10,0	5,00–10,0
10^{-8} і нижче	10,0–50,0	10,00–20,0

ДОДАТОК 12. Рідини, що використовують для вимірювання надлишкових тисків[42]

Назва рідини	Густина при 20 °С, кг/м³	Температура, °С		Поверхнєве натягіння при 20 °С, 10 ³ Н/м	Коефіцієнт динамічної в'язкості при 20 °С, Н·с/м²	Тиск насичених парів при 20 °С, мм рт.ст.	Взаємодія з іншими речовинами	Фізіологічна дія на людину	Інші властивості
		кипіння	замороження						
Спирт етиловий	789,3	78,3	-117	22,3	1,2	44,5	розчиняє лаки та фарби	наркотик, викликає збудження, а потім параліч нервової системи	прозора безколірна рідина без неприємного запаху та смаку. При додаванні води густина збільшується
Дистильована вода	998,2	100	0	72,8	1,0	17,5	викликає корозію заліза та сталей	не токсична	безколірна, прозора рідина
Чотирихлористий вуглець	1590	76,6	-22,8	26,8	0,97	-	в воді не розчиняється та з водою створює різку межу. Розчиняє гуму, викликає корозію металу	наркотик. Подразнює слизові оболонки та шкіру. Токсичний. Діє на нервову систему, печінку та нирки. ГДК 5 · 10 ⁻⁵ кг/м³	безколірна, летюча рідина з ефірним запахом. Добре змочує скляні трубки без забруднень. При стиканні з полум'ям або розжареними предметами виділяє фосген
Ртуть	13546	356,9	-38,87	465..500	1,55	1,2 · 10 ⁻³	розчиняє метали, з міддю, сріблом, золотом, цинком, кадмієм, оловом, свинцем утворює амальгами. Не сильно діє на залізо та сталь	сильна протоплазмена отрута. Отруєння відбувається при вдихуванні парів металевої ртуті	Рідкий метал

ДОДАТОК 13. Рідини, що використовують для вимірювання низьких абсолютних тисків[42]

Назва рідини	Густина при 20 °С, кг/м ³	Температура, °С		Коефіцієнт динамічної в'язкості при 20 °С, Н · с/м ²	Тиск насичених парів при 20 °С, мм рт.ст.	Взаємодія з іншими речовинами	Фізіологічна дія на людину	Інші властивості
		кипіння	замерзання					
Дибутилфталат	1046–1049,2	340	від –10 до –35	52,46	1·10 ⁻⁶	у воді не розчиняється. При дотиканні з повітрям абсорбує газ	не токсичний.	перед вимірюваннями потребує тривалого очищення від газів.
Полисил – оксанові рідини а)етиллова №2	930–955,3	110 (при 1 мм рт.ст)	–60	5,7...10,8	2·10 ⁻⁴	природний та синтетичний каучук не розчиняють. На пластмаси та інші органічні матеріали не діють	не токсичні.	мають стабільні фізи-ко-хімічні властивості, високу інертність та підвищену термоокислювальну властивість.
б)етиллова №6	990–1020	250	–70	180–240	1·10 ⁻⁵	–	–	Мало адсорбують газ
Вазелінове Масло	870	120	–60	17,68	–	на метали, гуму, та органічні матеріали не діє	не токсична.	прозора, безколірна рідина.

ДОДАТОК 14. Основні характеристики деформаційних манометрів[61–65]

Назва приладу, марка	Фірма, країна виготовлення	Вимірюване середовище	Діапазон вимірювань тисків	Поріг чутливості	Основна похибка,% або клас точності	Умови експлуатації	
						Температура, °С	Захист від пилу та води (ІР) або % Вологості
Манометр показуючий МПЗ-У[61]	Манометр, Росія	неагресивні рідини, газ, кисень, ацетилен	0–1600 [кгс/см ²]	–	1,5	–50...+60 (металевий корпус)	ІР 40
Манометр нержавіючий ДМ-05–07 [62]	Скло-прилад, Україна	рідина, пар, газ (застосовується у харчовій, хімічній та фармацевтичній промисловості де вимоги до поверхонь, контактуючих з вимірювальним середовищем є підвищеними)	0–60 [МПа]	–	1; 1,5	–40...+150	ІР 65
Цифровий диференціальний манометр GM 520[63]	Venetech, Китай	газ	±35 [кПа]	0,01 [кПа]	±0,3% (при 25°С)	0...+50	ІР 57
Манометр надвисокого тиску СВ 2500[64]	ООО АсГард, Росія	вибухобезпечні рідини, що не кристалізуються, нейтральні до мідних сплавів	0–2500 [кгс/см ²]	–	±1% (при 23±2°С)	10...+35	80
Манометр, мановаку-метр МТП-4М [65]	Манотомь, Росія	неагресивні рідини, газ, кисень, ацетилен	Надлишковий 1,6–400, вакуумічний 1 [кгс/см ²]	–	2,5; 4; 4–2; 5–4	–60...+60	80

ДОДАТОК 15. Характеристики барометрів-анероїдів [45]

Назва	Тип	Діапазон вимірювань тисків, мм рт.ст	Чутливість (ціна поділки)	Погрішність
Барометр анероїд	М-67	610–790 мм рт.ст (81–102 кПа)	1 мм рт.ст, 0,133 кПа	0,8 мм рт.ст, 0,1 кПа
Барометр анероїд метеорологічний	БАММ-1	600–800 мм рт.ст (79,8–106,6 кПа)	0,5 мм рт.ст	–
Барометр анероїд	М-98	300–810 мм рт.ст 40–107,7 кПа	1 мм рт.ст, 0,133 кПа	1 мм рт.ст, 0,133 кПа

ДОДАТОК 16. Характеристики датчиків для вимірювання низьких абсолютних тисків [66–72]

Марка датчика	Фірма, країна виготовлення	Принцип дії	Діапазон вимірювань тисків, мм рт. ст (торр)	Точність вимірів, %	Габаритні Розміри	
					Діаметр, мм	Довжина, Мм
Комбінований датчик Пірані VSN89D [66]	Edwards, Велика Британія	термо-резисторний (Пірані), Байярда-Альперта	750–5·10 ⁻¹⁰ (10 ³ –5·10 ¹⁰ мбар) макс. надлишковий. абс. тиск 4 бар	1000–10 мбар < 30% 10–10 ⁻⁸ мбар < 10%	69	141
ПМТ-2 [67, 68]	НПП Контакт, м.Сарагов, Росія	термопарний	5–10 ⁻³	±20% від 1 до 10 ⁻³ мм рт. ст ±40% від 5 до 1 мм рт. ст	34	265
Вакууметр Пірані PVG-500/ PVG-500 [69]	Agilent Technologies, Італія	термопарний	750–10 ⁻⁴ (1000–10 ⁻⁴ мбар)	±50 від 5 10 ⁻⁴ до 10 ⁻³ мбар ±15 від 10 ⁻³ до 100 мбар ±50 від 100 до 1000 мбар	45,0	70,3
ПМІ-2 [70]	Термодат, м.Пермь, Росія	іонізаційний	10 ⁻³ –10 ⁻⁷	–	32	280

Продовження ДОДАТКА 16

Марка датчика	Фірма, країна виготовлення	Принцип дії	Діапазон вимірювань тисків, мм рт. ст.(torr)	Точність вимірів, %	Габаритні Розміри	
IGM401 Hornet [71]	Instru Tech, Inc США	іонізаційний	$6,7 \cdot 10^{-2}$ – $1,3 \cdot 10^{-9}$ мбар	±15%	Діаметр, мм	Довжина, Мм
Активний іонізаційний датчик Vacon ХС [72]	Vacom, ФРН	іонізаційний з гравітаційним катодом та системою Байярда-Альперта	$3,75 \cdot 10^{-2}$ – $3,75 \cdot 10^{-10}$	20%	71x 68	82
					73 (ширина), 99 66 (висота)	

ДОДАТОК 17. Прилади для вимірювання шуму, відомі з кінця XX ст.[77–80]

Прилад	характеристика	ВШВ-003 [77]	RTF 00017 [78]	RTF 00023 [79]	RTF 00024 [80]
Частотна корекція	А, С, Лин	А, С, Лин	А, С, Лин	А, С, Лин	А, С, Лин
Постійна часу	Швидко, повільно	Швидко, повільно	Швидко, повільно, імпульс	Швидко, повільно, імпульс	Швидко, повільно, імпульс
Частотний діапазон, Гц	2–18 000	2–18 000	0,2–100 000	20–20 000	20–12 500 (20–20 000)
Динамічний діапазон, дБ	25–140	25–140	19–140	10–140	26–140 (5–143)
Похибки вимірювань, дБ	1	1	1	1	1
Габаритні розміри, мм	100 x 280 x 240	318 x 114 x 190	318 x 114 x 190	318 x 114 x 190	105 x 85 x 270
Вага, кг	4,0	4,0	4,0	4,0	3,1(1,4)
Фірма, країна-виробник	«Виброприбор», м.Таганрог, СРСР	«Роботрон», НДР	«Роботрон», НДР	«Роботрон», НДР	«Роботрон», НДР

ДОДАТОК 18. Характеристики сучасних приладів для вимірювання виробничого шуму, інфра- та ультразвуку [76, 81–89, 91]

Назва приладу, марка	Фірма, країна виготовлення	Частотна корекція	Частотний діапазон, Гц	Дина мічний діапазон, дБ	Похибки вимірювань/чутливість, дБ (або клас точності)	Габаритні розміри, мм	Вага, кг
ВІП-2000 [76]	ОАО «МНІПІ», Беларусь	А, С, Лин	10–20 000	25–136	±0,7/ 1 клас точності	230x110x36	0,8
BenetechGM1351 [81]	Benetech, Китай	–	31,5–8 500	30–130	±1,5/0,1	149x57x26	0,144
Wintact WT-85 [82]	Benetech, Китай	А	31,5–8 000	30–130	±1,5/0,1	177x36x56	0,096
Flus MT-901A [83]	Flus, Китай	–	31,5–8 000	30–130	±1,4/0,1	144x55x38	0,12
Walcom HT-90A [84]	Walcom, Італія	А	31,5–8 000	35–130	±1,5/0,1	206,2x56x45,7	0,11 (без аку- мулятора)
TENMARS TM-102 [85]	Tenmars Electronics, Тайвань	–	30–8 000	30–130	±1,5/0,1	200x55x38	0,29
Октава 101А [86]	Октава – Електрон Дизайн, Росія	А, С, Лин	1,6–20 режим інфразвуку 10–20 000 режим звуку	25–145	–/1 клас точності	354x86x36	0,7
Октава 110А [87]	Октава –Електрон Дизайн, Росія	А, С, Z – шум; А, Z, G, F1 – інфразвук	З окт. фільтрами 2–16 режим інфразвуку 31,5–16 000 режим звуку 1–125 загальна вібрація	22–139	–/1 клас точності	234x86x36	0,55

Продовження ДОДАТКА 18.

Назва приладу, марка	Фірма, країна виготовлення	Частотна корекція	Частотний діапазон, Гц	Динамічний діапазон, дБ	Похибки вимірювань/чутливість, дБ (або клас точності)	Габаритні розміри, мм	Вага, кг
АСИСТЕНТ СИU 30 [88]*	НТМ–Защита, Росія	A, C, Z –шум;	10–20 000	10–150	–1 клас точності	190x37x117	0,8
		G, Z– інфразвук	1,6–20	10–150			
		ультразвук	12 500– 40 000	30–150			
АСИСТЕНТ STU V1 [89]*	НТМ–Защита, Росія	A, C, Z –шум;	10–20 000	10–150	–1 клас точності	190x37x117	0,8
		G, Z– інфразвук	1,6–20	10–150			
		ультразвук	12 500– 40 000	30–150			
		Загальна вібрація: Wd, Wk, Wm, Wc, We, Wj, Wj, Wb, Wm, Bw, Bwm	0,8–80	60–170			
		Локальна вібрація: Wh, Bh	8–1250	60–170			
Экофизика 110А, виконання НГ[91]*	ООО «ПКФ Цифровые приборы», Росія	A, AU, C, Z шум	16–12 500	21(25) –140(159 max)	±0,7	176x86x35	0,6
		інфразвук	1–16		± 0,4		
		ультразвук	12 500–100 000		1 клас точності		
		Загальна вібрація: Wb, Wc, Wd, We, Wj, Wk, Wm, Fk, Fm					

Примітка.* Більш повна інформація про характеристики приладів АСИСТЕНТ СИU 30, АСИСТЕНТ STU V1, Экофизика 110А, виконання НГ, наведена у джерелах [88, 89, 91]

ДОДАТОК 19. Характеристики сучасних приладів для вимірювання вібрації[96–103].

№ з/п	Назва, марка	фірма, країна виготовлення	Частотний діапазон, кГц	Вібро-швидкість	Вібро-прискорення	Вібро-переміщення мм	Чутливість	Похибка, %
1	Віброметр Walkom VM-6360 [96]	Walkom, Італія	1–20	0,01–400 мм/с; 0,1–200 мм/с (при частоті 10–1 000 Гц)	0,01–400 мм/с² (при частоті 10–1 000 Гц)	0,001–4,0	0,01 мм/с²; 0,1 мм/с²; 1 об/хв	<5+2 цифри
2	Віброметр TV 110 [97, 98]	«Time Group Inc», Китай	0,01–10	0,01–20 см/с (при частоті 10–500 Гц 10–1кГц)	0,1–200 м/с² (при частоті 10–500 Гц; 10Гц–1кГц 10Гц–10кГц)	0,001–1,999	–	± 5
3	Віброметр Beneteth AR63B (GM63B) [99]	Benetech, Китай	0,01–15	0,1–199,9 мм/с	0,1–199,9 м/с²	–	–	± 5
4	Портативний віброметр ПВТ-5М[100]	ООО НПФ «Промвитех», Росія	0,01–1	1,0–70 мм/с	0,1–100 м/с²	0,005–0,7	–	± 5
5	Віброметр AV-160A [101]	Shenzhen Graigar Technology Co., Ltd, Китай	1–20	0,1–400 мм/с	0,1–400 м/с²	0,001–4	–	± 5
6	Віброметр 795M107B [102,103]	ІНТРОН-СЕТ ЛТД, Україна	2–10	0,1–79 мм/с	0,01–200 м/с²	0,003–5	–	± 5

ДОДАТОК 20. Характеристики приладів для вимірювання рівнів яскравості робочих поверхонь[113–118].

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Діапазон вимірювання яскравості, кд/м ²	Спектральний діапазон, мкм	Похибка вимірювань, %
1	Аргус-02 [113]	ФГУП ВНИИОФИ, Росія	1,0–2·10 ⁵	0,38–0,8	10
2	Konica Minolta LS-100 [114]	«Konica Minolta Sensig, Inc.», Японія	швидко: 0,001–299900 повільно: 0,01–49990	–	від 0,001–0,999 кд/м ² : ± 2% ± 2 знака від відображуемого значення; від 1 кд/м ² та вище: ± 2% ± 1 знак від відображуемого значення.
3	Konica Minolta LS-110 [114]	«Konica Minolta Sensig, Inc.», Японія	швидко: 0,01–999900 повільно: 0,01–499900	–	від 0,01–9,99 кд/м ² : ± 2% ± 2 знака від відображуемого значення; від 10,0 кд/м ² та вище: ± 2% ± 1 знак від відображуемого значення.
4	Konica Minolta LS-150 [115]	«Konica Minolta Sensig, Inc.», Японія	0,001–999900	–	нижче 1 кд/м ² : ± 2% ± 2 знака від відображуемого значення; від 1 кд/м ² та вище: ± 2% ± 10 знаків від відображуемого значення.
5	Konica Minolta LS-160 [115]	«Konica Minolta Sensig, Inc.», Японія	0,01–9999900	–	нижче 1 кд/м ² : ± 2% ± 2 знака від відображуемого значення; від 10,0 кд/м ² та вище: ± 2% ± 10 знаків від відображуемого значення.
6	ЯРМ-3 [116]	АООТ «Загорский оптико-механический завод», Росія	0,0001–100000000	0,38–0,75	8
7	ТКА-КИНО [117]	АО «Эквис», Росія	10–2000	–	±6
8	Люксметр-яскравомір ТЕС-0693 [118]	ООО НПФ «Тензор», Україна	10–2·10 ⁵	0,38–0,78	±7

ДОДАТОК 21. Характеристики приладів для вимірювання ультрафіолетового випромінювання[122–127].

№ з/п	Назва, марка	Фрма, країна виготовлення	Спектральний діапазон, мкм	Діапазон енергетичної освітленості	Межа основних відносних похибок вимірювань, %
1	Радіометр УФ-А Аргус-04 [122]	ФГУП ВНИИОФИ, Росія	0,315–0,4	0,01–20 Вт/м ²	± 10
2	Радіометр УФ-В Аргус-05 [122]	ФГУП ВНИИОФИ, Росія	0,28–0,315	0,01–20 Вт/м ²	± 10
3	Радіометр УФ-С Аргус-06 [122]	ФГУП ВНИИОФИ, Росія	0,2–0,28	0,01–20 Вт/м ²	± 10
4	UVAB TENMARS TM-213 [123]	Tenmars Electronics, Тайвань	0,290–0,390	4000 мкВт/см ² ; 20 мВт/см ²	± 5 повного діапазону +2 одиниці
5	Радіометр Тензор-31 [124]	ООО НПФ «Тензор», Україна	0,220–0,400	10 ⁻⁴ –2·10 ² Вт/м ²	± 10
6	Радіометр-дозиметр Тензор-71 [125]	ООО НПФ «Тензор», Україна	0,200–0,400	10 ⁻⁴ –2·10 ² Вт/м ²	± 15
7	Extech UV510 [126]	EXTEC INSTRUMENTS, Тайвань	0,320–0,390	0–1,999 мВт/см ² 2–20 мВт/см ²	± 4
8	Extech UV505 [127]	EXTEC INSTRUMENTS, Тайвань	0,290–0,390	1–3990 мкВт/см ² 0,01–40 мВт/см ²	± 5

ДОДАТОК 22. Характеристики приладів для вимірювання інфрачервоного випромінювання [128–132].

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Спектральний діапазон, мкм	Діапазон вимірювань, Вт/м ²	Похибка вимірювань, %
1	Радіометр енергетичної освітленості РАТ- 2П-ф [128]	ООО НПФ «Тензор», Україна	0,2–25 (без інфрачервоного фільтра) 1–15 (з інфрачервоним фільтром)	10–2·10 ⁴	± 6
2	Радіометр енергетичної освітленості РАТ- 2П-Кварт-41 [129]	ООО НПФ «Тензор», Україна	0,2–25 (без інфрачервоного фільтра) 1–25 (з інфрачервоним фільтром)	10–2·10 ⁴	± 6
3	Актинометр Пеленг СФ-12 [130]	ОАО «Пеленг», Беларусь	0,3–10	40–1,1·10 ³	±4
4	Радіометр Аргус-03 [131]	ФГУП ВНИИОФИ, Росія	0,4–25	1–3,5·10 ³	±6
5	Радіометр ИК-метр [132]	ООО «НТМ-Защита», Росія	1–25	10–2,5·10 ³	±6

ДОДАТОК 23. Характеристики приладів для вимірювання рівнів імпульсного та безперервного лазерного випромінювання[138–142].

Технічні характеристики приладів	Назва приладів, фірма, країна -виробник	Дозиметр лазерний «Ладін», ООО АК «ТУЛАМАШЗАВОД» (Росія) [138,139]	Дозиметр лазерний ЛД-07, ООО «НТМ-Защита», Росія [140,141]	Вимірювач для лазерної дозиметрії ИЛД-2М, Опытный завод «Эталон» (Росія) [142,105]
Спектральні діапазони, мкм		0,48–1,15	0,4–1,0	0,49–1,15
		1,15–1,8	1,0–20	2–11
Робочі довжини хвиль лазерного випромінювання		2,0–11,0		
		0,48; 0,53; 0,63; 0,69;	0,48; 0,53; 0,63; 0,69;	0,53; 0,63; 0,69; 1,06
		0,78; 0,85; 0,92; 0,98; 1,06; 1,15; 1,30; 1,54; 10,6	0,78; 0,85; 0,91; 0,98; 1,06; 1,15; 1,30; 1,54; 5,5; 10,6	10,6
Діапазони вимірювань опроміненості від безперервного лазерного випромінювання, Вт/см ²		10^{-6} – 10^{-2}	10^{-7} – $2 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-7}$ –10
		10^{-5} – 10^{-1}	10^{-4} –1	
		10^{-3} –1		10^{-3} –1
Діапазони вимірювань енергетичної експозиції від імпульсного лазерного випромінювання, Дж/см ²		10^{-8} – 10^{-4}	10^{-8} – $2 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-9}$ –1
		10^{-7} – 10^{-3}	10^{-4} –1	10^{-5} – 10^{-1}
Діапазони вимірювань сумарної енергетичної експозиції за час вимірювання(дози), Дж/см ²		10^{-8} – 10^2	10^{-8} – 10^3	–
		10^{-7} – 10^3	10^{-5} – $5 \cdot 10^{-1}$	
Межі допускаємих похибок, %		10^{-5} – 10^{-4}		
		±15–25	±15–25	±18
				±20

ДОДАТОК 24. Характеристики приладів для вимірювання потужності лазерного випромінювання[143–146]

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Діапазон робочих довжин хвиль, нм	Діапазон вимірювань потужності	Точність вимірювань, %
1	Вимірювач потужності лазерного випромінювання SANWA LP-1 [143]	SANWA, ELECTRIC INSTRUMENT CO. LTD, Японія	400–1100	40, 0мкВт/400, 0 мкВт/4,0 мВт/40,0 мВт	± 5
2	Вимірювач потужності лазерного випромінювання SANWA OPM-572 [144]	SANWA, ELECTRIC INSTRUMENT CO. LTD, Японія	650; 780; 800; 850; 880	1,000 нВт – 20,00 мВт	± 5
3	Вимірювач потужності випромінювання ІМІІ-01 [145]	ООО «Бионм», Росія	890 ±20 (імпульс) 532; 635; 650; 810; 980 (безперервне)	0,5–50 Вт (імпульс) 0,5–100 мВт (середня потужність)	± 5–15
4	Вимірювач потужності випромінювання РБК-7101 [146]	ООО «Западприбор», Росія	630	2–50 мВт	± 15

ДОДАТОК 25. Величини, що характеризують електромагнітне поле

Величина	Одиниці вимірювань	
	Назва	Позначення
Напруженість електричного поля (E)	Вольт на метр	В/м
Електрична індукція(D)	Кулон на квадратний метр	Кл/м²
Напруженість магнітного поля (H)	Ампер на метр	А/м
Магнітна індукція (B)	Тесла	Тл
Щільність струму(i)	Ампер на квадратний метр	А/м²
Сила струму (I)	Ампер	А
Електричний заряд (q)	Кулон	Кл
Електрична напруга (U)	Вольт	В
Щільність потоку енергії електромагнітного поля (ШПЕ) або (W)	Ват на квадратний метр	Вт/м²

ДОДАТОК 26. Прилади для вимірювання щільності потоку електромагнітного випромінювання[149–153]

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Частотний діапазон довжин хвиль,	Щільність потоку випромінювання	Вага, кг	Точність вимірювань, %
1	Аналізатор електромагнетизму (базова серія) HF-32D [149]	Gigahertz Solutions, ФРН	800 МГц – 2,7 ГГц	1–1 999 $\mu\text{W}/\text{m}^2$	0,44	лінійне відхилення: ± 6 дБ зсув нуля ± 9 одиниць
2	Радіо-частотний аналізатор (професійна серія) HF-58B [150]	Gigahertz Solutions, ФРН	800МГц–2,7(3,3 ГГц зі збільшенням відхиленням)	0,01–19 900 mW/m^2	1,79	лінійне відхилення: $\pm 4,5$ дБ зсув нуля ± 7 одиниць
3	HFE-35C Комплект [151]	Gigahertz Solutions, ФРН	27 МГц – вище 2,7 ГГц	0,1–1 999 mW/m^2	1,06	лінійне відхилення: ± 6 дБ зсув нуля ± 9 одиниць
4	Вимірювач щільності потоку енергії електромагнітного поля ПЗ–33М [152]	ООО НТМ «Защита», Росія	0,3–18,0 ГГц	1–100 000 mW/cm^2	0,55	на рівнях 1,0 до 5,0 mW/cm^2 ± 3 дБ на рівнях більше 5,0 mW/cm^2 ± 2 дБ
5	Радіо-частотний аналізатор HFV-59D з високо-частотним підсилювачем HV20 [153]	Gigahertz Solutions, ФРН	2,4–10,0 ГГц	0,01–19 990 mW/m^2	1,25	лінійне відхилення: $\pm 4,5$ дБ зсув нуля ± 5 одиниць

ДОДАТОК 27. Прилади для вимірювання напруженості електричних та магнітних полів [154–157]

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Частотний діапазон довжин хвиль,	Діапазон вимірювань				Вага, кг	Точність вимірювань або похибка, (% дБ)
				Напруженість електричного поля	Напруженість магнітного поля	Щільність потоку випромінювання			
1	Вимірювач рівнинного поля АТТ-2592 [154]	АКТАКОМ, Тайвань	50МГц–3,5 ГГц	20 мВ/м–108 В/м	20 мА/м–108 А/м	0 мкВт/м ² –30,93 Вт/м ²	0,2	0,1мВ/м; 0,1мкА/м; 0,001 мкВт/м ² ; (1 дБ)	
2	Вимірювач рівнинного фону АТТ 2593 [155]	АКТАКОМ, Тайвань	10МГц–8ГГц	20 мВ/м–108 В/м	20 мА/м–108 А/м	0 мкВт/м ² –30,93 Вт/м ²	0,25	0,1мВ/м; 0,1мкА/м; 0,001 мкВт/м ² ; (1 дБ)	
3	TM-190 Вимірювач напруженості електромагнітного поля багатofункціональний [156]	Tenmars Electronics, Тайвань	50/60 Гц; 50 МГц – 3,5 ГГц	50В/м – 2000 В/м;	0,02–2000 мГс; 0,02–2000 мкТл	0,02 мкВт/м ² –554мВт/м ²	0,12	1В/м; 0,1мВ/м; 0,1мкА/м; 0,001 мкВт/м ² ; (1 дБ); ±2дБ при 2,45 ГГц	
4	ВЕМЕТР-Т-004 Вимірювач електричного та магнітного полів [157]	ООО НТМ «Защита», Росія	5Гц–2кГц 2–400 кГц 45–55Гц 5Гц–2 кГц (за викл. 45–55 Гц)	5–1000 В/м 0,5–40 В/м 5–1000В/м 5–1000В/м	80 мА/м– 8 А/м 4–400мА/м 80мА/м–8А/м 80мА/м – 8А/м	– – – –	0,3	± 15	

ДОДАТОК 28. Характеристики деяких аналогових амперметрів[162–170]

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Принцип дії	Діапазон вимірів	Габарити, мм	Клас точності
1	Міліамперметр М4200[162]	«Электро-инструмент», СРСР ОАО»Электроприбор», Росія ОАО»Электроприбор», Росія ОАО»Электроприбор», Росія «Росток прибор ЛТД», Росія ОАО»Электроприбор», Росія ОАО»Краснодарский ЗИП», Росія	магніто-електричний	1–600 мА	80х80х49	1,5–2,5
2	Міліамперметр М4231.62[163]			0–1 мА	40х40х43	4
3	Міліамперметр М42300[164]			10 мА –150кА	80х80х49	1,5
4	Міліамперметр М42243[165]			5 мА –20 мА	140х42х64	1,0
5	Амперметр Э514/1[166]		електро-магнітний	1А–2А	140х195х105	0,5; 1
6	Амперметр Э4200[167]			1–50А	120х120х50	1,5; 2,5
7	Міліамперметр Э350[168]			5мА–300А	96х96х64	1,5
8	Міліамперметр Д 5100[169]	ВО «Точелек-троприлад», Україна	електро-динамічний	0–5А	(205±1,45)х (290±1,6)х (135±2,0)	0,1
9	Міліамперметр Д 5014/4[170]	Пермская приборостроительная компания, Росія		0–100мА	(205±1,45)х	0,2
10	Амперметр Д 5014/1[170]			0–200мА	(290±1,6)х	
				0–5А	(135±2,0)	
				0–10А		

ДОДАТОК 29. Характеристики електронних вольтметрів [171, 173–182].

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Діапазон напруг	Діапазон частот	Габарити, мм	Похибка вимірювань, %
1	Вольтметр диференційний В2–36[171]	Краснодарский завод радиоизмерительных приборов, СРСР	0,05мкВ –19,999 В	–	490х 135х 355	$\pm[0,15 + 0,05(U_k/U_x - 1)]$
2	Вольтметр-калібратор В2–43*[173]	ОАО «НПК Ритм», Росія	$\pm 0,1\text{мкВ} - 1\,000\text{ В}$	–	290х 75х 260	$\pm(15\text{млн}^{-1}U + 2\text{млн}^{-1}U_p)$ (за 1 рік)
3	Вольтметр постійного струму цифровий В2–38*[174, 175]	«Белвар», Беларусь	$10^{-9} - 2\text{ В}$	–	120х 480х 475	0,08–0,1
4	Мілівольтметр В3–38[176]	«Пунане-РЕТ», СРСР (Естонія)	0,1мВ–300В	20Гц–5 МГц	152х 206х 275	$\pm 2,5$
5	Вольтметр В7–35 універсальний цифровий* [177–179]	Краснодарский завод радиоизмерительных приборов, СРСР	$10^{-4} - 1\,000\text{В}$	0–300 МГц	227х 200х 70	$\pm[0,2 + 0,1 (x/x_i - 1)]$ у межах від 100мВ до 1 000В постійного струму
6	Вольтметр В7–64М універсальний * [180]	ЗИП-Эталон», Росія	$V = 100\text{мВ} - 1\,000\text{В}$ $V - 100\text{мВ} - 750\text{В}$	5 Гц –300 кГц	225х 100х 355	$0,005\% \pm 0,0010\%$ (постійний струм)
7	Вольтметр універсальний цифровий В7–78/1 *[181,182]	АКИП, Тайвань	$V = 0,1\text{мВ} - 1\,000\text{В}$ $V - 0,1\text{мВ} - 750\text{В}$	3Гц–300кГц	224х 113х 373	$\pm(0,0035\% \text{ вим.} + 0,0005\% \text{ діапазона})$ (постійний струм)

* Більш повні технічні характеристики наведені у *[173]; *[175]; *[177–179]; *[180]; *[181,182].

ДОДАТОК 30. Порівняльні характеристики аналогових та електронних мегаомметрів [183–186].

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Тип	Діапазон опорів	Діапазон напруг	Діапазон струму	Похибка вимірювань, % (для опору ізоляції)
1	Аналоговий мегаомметр ЕС0202/2-Г [183,185]	ПАТ Уманський завод «Мегаом-метр», Україна	A*	0,0 – 10 000 МОм	–	–	± 15% від вимірюємої величини
2	Мегаомметр Venetech GM3125[184]	Venetech, Китай	E*	0,0 – 1000 ГОм	30–600 В	–	±(5% від вимірюємої величини ±5 емр)
3	Мультиметр-мегаомметр BM887*[185]	Brunel, Тайвань	E*	60,0 Ом – 60,0 МОм	60 мВ –1000 В	600,0 мкА – 10 А	1,5%+5емр
4	Мультиметр-мегаомметр BM878*[185]	Brunel, Тайвань	E*	600,0 Ом – 25,0 ГОм	60 мВ –1000 В	60,0 мА–600,0 мА	1,5%+5емр
5	Метомметр YF-509*[185]	Shenzhen Graigar Technology CO., Ltd, Тайвань	E*	0,1 МОм–200 МОм	V=1000 В V~ до 750 В	–	±(3% + 3 емр)
6	Метомметр TM-507*[185]	Tenmars Electronics, Тайвань	E*	4 МОм – 4000 МОм	V~ = 0–600 В	–	±(2% від вимірюємої величини ±5 емр)*
7	Мегаомметр E6-24*[185]	Радио-Сервис, Росія	E*	0,01 МОм– 300 ГОм	V~40–400 В	–	±(3% + 3 емр)*
8	Мегаомметр MS5205** [186]	Mastech, Тайвань	E*	0,0– 100 ГОм	V=1000 В V~ до 750 В	–	±(3% + 5 емр)**

Примітка. A*– аналоговий, E*– електронний.

* Більш повні технічні характеристики наведені у *[185]; **[186].

ДОДАТОК 31. Порівняльні характеристики аналогових мостів виробництва радіоелектронної промисловості колишнього СРСР* [187–193].

№ з/п	Назва, марка	Діапазон вимірів	Похибка вимірювань %, або клас точності
1	Міст МО-61[187]	Опір: 10мкОм – 100 МОм	±0,05–1%
2	Міст постійного струму МО-62[188]	Опір: 2 · 10 ⁻⁵ Ом – 106 Ом, опір ізоляції: 1МОм – 100 МОм	±0,02–5% (в різних межах)
3	Міст Р329[189]	Опір Подвійний міст: 0, 000001–100 Ом Одинарний міст: 50 Ом – 111110 Ом	Подвійний міст: 1,5; 0,5; 0,1; 0,05 Одинарний міст: 0,05; 0,5
4	Міст постійного струму Р333[190]	Опір: 1–99990 Ом; 1 · 10 ⁻¹ –0,9999 Ом; 5 · 10 ⁻³ –0,0999 Ом; 10 ³ –999990 Ом	0,5; 1,0; 5,0
5	Міст постійного струму Р4053[191]	Опір: 0,01 Ом – 9999,9 ТОм	±0,01 Ом до ± R·10 ⁻¹⁴
6	Міст постійного струму Р4060[192]	Опір: 0,01 Ом – 10 ¹² Ом	Основна похибка при 10 ¹² Ом – ±5% ; Класи точності 0,05 до 10
7	Міст напівавтоматичний універсальний ВМ 509[193]	Опір: 0,05–1000 МОм; Електричний заряд: 0,05пф – 1000 мкф Індуктивність: 5мкГн – 100 Гн	Допустима похибка від ±0,25 до 10% для різних діапазонів та величин

Примітка. * Більш детальні характеристики у джерелах* [187–193].

ДОДАТОК 32. Порівняльні характеристики сучасних RLC-метрів (вимірювачів опорів, індуктивностей та ємностей [194–201].

№ з/п	Назва, марка	Фрма, країна виготовлення	Діапазон опорів(R_s, R_p)	Діапазон індуктивностей(L_s, L_p)	Діапазон ємностей (C_p, C_p)	Похибка вимірювань, %
1	Вимірювач імітанса E7-20 [194,195]*	ОАО «МНІПІ», Беларусь	$10^{-5} - 10^9 \text{ Ом}$	$10^{-11} - 10^4 \text{ Гн}$	$10^{-15} - 1 \text{ Ф}$	$\pm 0,1$
2	Професійний LCR-метр DT-9930 [196]	«СЕМ ін-стру-мент», Китай	$0 - 110 \text{ МОм}$	$0 - 20 \text{ Гн}$	$0 - 110 \text{ мФ}$	$C \pm 2,0$ $L \pm 3,0$ $R \pm 1,2$
3	Мультиметр LCR-метр DM4070 [197]	Sinometer, Китай	$0,01 \text{ Ом} - 20 \text{ МОм}$	$0,1 \text{ мкГн} - 20 \text{ Гн}$	$0,1 \text{ пФ} - 2000 \text{ мкФ}$	$C \pm (2,5 \pm 5 \text{ од. рах.})$ $L \pm (2,0 \pm 5 \text{ од. рах.})$ $R \pm (0,8 \pm 2 \text{ од. рах.})$
4	Вимірювач RLC UNI-T UTM1611 [198, 199]	UNI-T, Китай	$60 \text{ Ом} - 20 \text{ МОм}$	$600 \text{ мкГн} - 200 \text{ Гн}$	$600 \text{ пФ} - 10 \text{ мкФ}$	C, L, R $\pm (0,5 + 5 \text{ од. рах.})$
5	Портативний LCR вимірювач AMPROBE LCR55A [200]	ВЕНА AMPROBE, США	$0,01 \text{ Ом} - 20 \text{ МОм}$	$0,1 \text{ мкГн} - 200 \text{ Гн}$	$0,1 \text{ пФ} - 2000 \text{ мкФ}$	$C \pm 1,0$ $L \pm 5$ $R \pm 0,5$
6	Портативний LCR вимірювач Sanwa LCR 700[201]	SANWA, ELECTRIC INSTRUMENT CO. LTD, Японія	$20 \text{ Ом} - 200 \text{ МОм}$	$20,0 \text{ мкГн} - 20 \text{ кГн}$	$200 \text{ пФ} - 20 \text{ мкФ}$	$0,3$

Примітка.* Більш детальні характеристики у джерелах* [194–195].

ДОДАТОК 33. Порівняльні характеристики вимірювачів опору заземлення[204 – 209]

№	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Діапазон вимірювання опорів, Ом	Похибка вимірювань, %	Габарити, мм
1	Тестер заземлення UNI-T UT522 [204]	UNI-T, Китай	0–20 0–200 0–2 000	$\pm 2 \pm 0,1$ Ом $\pm 2 \pm 3$ Ом	160x100x70,5
2	Струмові кліщі UT275 (UTM 1275) [205]	UNI-T, Китай	0,01–0,099 0,1–0,99 1,0–49,9 50,0–99,5 100–199 200–395 400–590 600–1 000	$\pm 1 \pm 0,01$ Ом $\pm 1 \pm 0,01$ Ом $\pm 1,5 \pm 0,1$ Ом $\pm 2 \pm 0,5$ Ом $\pm 3 \pm 1$ Ом $\pm 6 \pm 2$ Ом $\pm 10 \pm 5$ Ом $\pm 20 \pm 10$ Ом	293x90x66
3	Вимірювач опору заземлення Ф4103 -M1. [206]	ПАТ Уманський завод «Мегаометр», Україна	0–0,3 0–1; 0–3; 0–10; 0–30; 0–100; 0–300; 0–1000; 0–3000; 0–15000	$\pm 4,0$ $\pm 2,5$	305x125x155
4	Вимірювач опору заземлення НІОКІ HiTester 3143[207]	НІОКІ, Японія	20,0–49,9 50,0–500,0	± 10 ± 5	155x98x49
5	Вимірювач опору заземлення SEM DT-5300B[208]	«SEM інструмент», Китай	0–20 0–200 0–2 000	± 2	200x92x50
6	Тестер опору заземлення Peakmeter PM2302[209]	PeakMeter, Китай	0–29,99 30,0–99,9 100–999 1 000–4 000	$\pm 2 \pm 6$ $\pm 3 \pm 3$	180x140x65

ДОДАТОК 34. Порівняльні характеристики електродинамічних, конденсаторних та електронно-лічильних частотомірів[210–230]

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Тип	Діапазон вимірів частот, Гц	Похибка вимірювань %, або/ клас точності
1	Частотомір щитовий аналоговий змінного струму ЭД2230 [210]	ООО «Западирибор», Росія	Електродинамічний	45–55	-/ Клас точності 1,0
2	Частотомір Д506/[211]	Пермская приборостроительная компания, Росія	Електродинамічний	45–55	+0,2/ Клас точності 0,2
3	Частотомір Д126[212]	Завод «Вібратор», Росія	Феродинамічний	45–55 350–450 450–550	Класи точності 0,3; 1,5
4	Частотомір Ф5043 [213, 214]	ВО «Точелектроприлад», Україна	Конденсаторний	20–20 000	±0,1(діапазон 45–55 Гц), ±0,2–0,5 в інших діапазонах частот
5	Частотомір переносний Ф433/3[215]	Пермская приборостроительная компания, Росія	Конденсаторний	$10^2 - 10^6$	± 6–11,5/ Класи точності 1,5; 2,5
6	Частотомір Ф5311 електроннолічильний [216]	Пермская приборостроительная компания, Росія	Електроннолічильний	$10^{-2} - 1,5 \cdot 10^8$	Абсолютна похибка приладу при вимірюванні числа електричних коливань не виходить за межі +1*
7	Частотомір електроннолічильний ЧЗ–54 [218]	ВАТ «Меридіан» ім. С.П. Королева, Україна	Електроннолічильний	$10^{-1} - 3 \cdot 10^8$	Похибка по частоті кварцового генератора за 1 місяць $1,5 \cdot 10^{-7}$
8	Частотомір електроннолічильний обчислювальний ЧЗ–63/1[219]	ВАТ «Меридіан» ім. С.П. Королева, Україна	Електроннолічильний	$10^{-1} - 1 \cdot 10^9$	± 5·10 ⁻⁷ ±1 одрах

Продовження ДОДАТКА 34.

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Тип	Діапазон вимірів частот, Гц	Похибка вимірювань %, або/ клас точності
9	Частотомір ЩЧ 120 [220]	ОАО «Електроприбор», Росія	-	10–9999; 10–15000	$\pm 0,05$ (з розрядністю 4,0); $\pm 0,01$ (з розрядністю 5,0); Перетворення $\pm 0,5$
10	Частотомір цифровий щитовий ЦЧ0205–3 [221, 222]	ПАТ Уманський завод «Мегаомметр», Україна	-	35–99,99; номінальна частота 50 Гц; 100–800; номінальна частота 500 Гц	0,04/0,04
11	Частотомір щитовий змінного струму ЦД100 [223]	ЗАО ПО «Електроточприбор», Росія	-	45–55	$\pm 0,01(0,005\text{Гц})/-$
12	Частотомір електроннолінійний обчислювальний ЧЗ–64[224]	ВАТ «Меридіан» ім. С.П. Королева, Україна	Мікропроцесорний	$5 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^9$	Відносна похибка по частоті опорного кварцового генератора: за 30 діб $\pm 1,5 \cdot 10^{-7}$; за 12 місяців $\pm 5 \cdot 10^{-7}$
13	Частотомір CNT-90 [225, 226]	PENDULUM, Швеція	Мікропроцесорний	$2 \cdot 10^{-3}$ – $3 \cdot 10^{8**}$	Сумарна похибка при температурі 20–26 °С — через рік після калібрування: $< 7 \cdot 10^{-6}$ — через 2 роки після калібрування: $< 1,2 \cdot 10^{-5}$

Продовження ДОДАТКА 34.

№ з/п	Назва, марка	Фірма, країна виготовлення	Тип	Діапазон вимірів частот, Гц	Похибка вимірювань %, або/ клас точності
14	Частотомер 1856D [227]	ВК Precision, США	Мікропроцесорний	$1 \cdot 10^{-1} - 3,5 \cdot 10^9$	-
15	Цифровий частотомер Zhaoxin HC-F2700I [228, 229]	ZHAOXIN Electronic Instrument Equipment, Китай	Мікропроцесорний	$10^{-2} - 7 \cdot 10^9$	-
16	Частотомер Victor VC3165 [230]	Victor, Китай	Мікропроцесорний	$1 \cdot 10^{-2} - 4 \cdot 10^9$	[Точність кварцового генератора] × [частота] ± [1 одиниця рахунку]

* Більш детальна інформація наведена у* [216], ** [225, 226].

Список джерел інформації

1. Температурные измерения: справочник/ О.А. Геращенко, А.Н. Гордов. и др.; Отв. ред. Геращенко О.А. – Київ: Наук. думка, 1989. –704 с.
2. Основи охорони праці: Навч. посіб. / За ред. В.В. Березуцького. – Харків: Факт, 2005. – 480 с.
3. Приборы контроля окружающей среды/ Манойлов В.Е., Неделин П.Н., Лукичев А.Н., Сапожков Л.Н., Турубаров В.И. Под ред. В.Е. Манойлова. — М.: Атомиздат, 1980–213 с.
4. Свойства элементов. Справочник / Дриц М.Е., Будберт П.Б., Бурханов Г.С., Дриц А.М., Пановко В.М./ Под ред. М.Е. Дрица. — М.: Металлургия, 1985. — 672 с.
5. ДСН 3.3.6.042–99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. — Київ, 2000.
6. Сплавы для термопар: справочное изд. И.Л. Рогельберг, В.М. Бейлин. — М.: Металлургия, 1983, — с. 360.
7. Автоматическое регулирование электрических печей. А.Д. Свенчанский, К.Д. Гуттерман. –М. -Л., изд-во Энергия, 1965, — 480 с.
8. Автоматизация металлургических печей./ В.Ю. Каганов, О.М. Блинов, Г.М. Глишков, В.А. Морозов. Под ред. О.М. Блинова. — М., Металлургия, — 1975. с. 376.
9. Стекло: Справочник. Под ред. Н.М. Павлушкина. — М.: Стройиздат, — 1973, 487 с.
10. Гордов А.Н. Основы пирометрии.– 2-е изд., доп. и перераб.–М.:Металлургия, 1971, 447 с.
11. Киренков И.Н. Метрологические основы оптической пирометрии.– М.: Изд-во стандартов, 1976, 140 с.
12. <http://simvolt.ua/prometri/>
13. <http://analitika.uaprom.net>>
14. <http://prom.ua/Pirometr-dt-8869h.html>>
15. <http://rus.adainstruments.com/shop/pyrometers/infrared-thermometer-ada-tempo-2200.html>>
16. <http://sova-dpr.com.ua>CEM.htm>>
17. www.mashprom.com.ua/пирометр raynger-mt6>
18. www.optics-pro.com.ua/тепловізор/pulsar-quantum-lite-xq23V>
19. <http://hunterstore.com.ua/p901136431-teplovizor-dalnomerom-tmr.html>
20. <http://prom.ua/p435628911-teplovizor-armasight-prometheus.html>>

21. <http://geoagronavt.com.ua/p647649314-teplovizor-fluke-tir.html>>
22. <http://gtest.com.ua/flir-e8-teplovizor.html>>
23. http://pergam.ua/catalog/thermal_imagers/diagnostic/testo-865.html>
24. http://pergam.ua/catalog/thermal_imagers/diagnostic/testo-872.htm#specification
25. <http://rilak.lv/ru/site/about/company>
26. <http://inkfoto.org.ua/vozvratnaya-termoindikatornaya-kraska-coloress-rose-red- 50-gradusov-1-kg>
27. <http://inkfoto.org.ua/termoindikatornaya-kraska-nevozvratnaya-coloress-red-65-gradusov-1-kg>
28. <http://inkfoto.org.ua/termoindikatornaya-kraska-vozvratnaya-tsvet-black-70c-v-1kg>
29. <http://inkfoto.org.ua/termoindikatornaya-kraska-nevozvratnaya-colorless-bright- red 120-gradusov-1kg>
30. <https://lkz-kronos.ru>
31. Безопасность производственных процессов: Справочник/ С. В. Белов, В. Н. Брынза, Б. С. Векшина и др.; Под общей ред. С. В. Белова. — М.: Машиностроение, 1985. — 448 с.
32. Нодельман М. Е. Справочник по кузнечному делу/ М. Е. Нодельман, Ю. А. Сидоренко. — Минск: Урожай, 1965. — 258 с.
33. <https://disted.edu.vn.ua/courses/learn/1546>
34. Перегуд Е. А. Инструментальные методы контроля загрязнений атмосферы/ Е. А. Перегуд, Д. О. Горелик. — Л. : Химия, 1981. — 384 с.
35. Измерение концентраций аэрозолей преимущественно фиброгенного действия: Метод. указания № 4436–87/ Минздрав СССР. М., 1987. — 28 с.
36. Контроль химических и биологических параметров окружающей среды. Под ред. Исаева Л. К. — СПб, Эколого-аналитический информационный центр «Союз», 1998. — 896 с.
37. Метеорологічні прилади та вимірювання/ Паламарчук Л. В., Шевченко О. Г. — К.: Видавництво «Інтерконтиненталь — Україна», 2012.. — 123 с.
38. Стернзат М. С. Метеорологические приборы и измерения. Л., Гидрометеиздат, 1978 . — 392 с.
39. Справочник по гидро-метеорологическим приборам и установкам. Рейфер А. Б., Алексенко М. И., Бурцев П. Н и др. Л., Гидрометеиздат, 1976 г. — 432 с.
40. <http://simvolt.ua>termoanemometr-delta-ohm-hd-2303.0-ru.html>

41. Маслова Н. С. Экспресс-информация в/о «Машприборинторг»
Аппаратура и средства измерения метеорологического назначения
за рубежом. Вып. 3. М., — 48 с.
42. Петунин А. Н. Измерение параметров газового потока./А.Н. Петунин. — М. Машиностроение, 1974. — 260 с.
43. <https://simvolt.ua>anemometr-analizator-teleskopichesky-az-96792>
44. <https://texnogaz.ru/anemometr-az-8919>
45. Приборы метеорологические, аэрологические и гидрологические.
Номенклатурный каталог. Центральный научно-исследовательский
институт информации и технико-экономических исследований при-
боростроения, средств автоматизации и систем управления. — М.
1985. — 65 с.
46. <https://simvolt.ua/anemometr-kompaktniy-tenmars tm -740.html>
47. <https://ua.bizorg.su/harkov-rg/c339461-tov-dataspectr/goods>
48. <https://russian.alibaba.com/product-detail/hy-wds2e-ultrasonic-anemometer-well-made-wind-speed-indicator-60704779399.html>
49. <https://ioit.ru/new/index.php/productsiya/item/231-lad-056>
50. www.indukr.com.ua/425.htm
51. https://mzpo.com.ua/cata/ogue/izmeriteli_t_i_vlagnosti/kimo_i_t_v/804-kimo-lv-101-lv-107-lv-110.html
52. <https://www.electronpribor.ru/files/products/tma-21hw1.pdf>
53. <https://www.evm.ua>gigrometry>termogigrometr-tenmars-tm-182>
54. www.izmerimvse.ua/Vlagomeri.aspx
55. <https://simvolt.ua>termogigrometr-walcom-ht-350.html>
56. https://mankor.ua/catalog/yams_vlagoanalizatory_kett/yamc_termogigrometry_testo_608_h1/
57. <https://radiovip.com.ua/catalog/izmeritelnye-pribory/termometry-gigrometry/termometr-fly-12-s-vynosnym-datchicom>
58. <https://brom.ua/shop/product/termogigrometr-flus-mt-903-mini>
59. <https://simvolt.ua/ezodo-t4-r.html>
60. Справочник по физическим основам вакуумной техники.
Кучеренко Е. Т. — Киев, «Вища школа», 1981, — 264 с.
61. <http://prom.ua/p8740714-mp3-manometr- mp3a.html>
62. <https://truboprom.com.ua/produkcija/kipia/manometry/manometry-dm-05-07-nerzhavejushhie/>
63. https://zakupka.com/p/674107724-cifrovou-diferencialnyy-manometr-gm520-0-01-35-kpa-benetech-mdr_2061/
64. www.ukrgazavt.com.ua/products/manometr-kotlovoj-2500kgssm2/

65. www.ukrgazavt.com.ua/products/manometru-manovacuummetry-pokazyvayushhie-mtp-m-mvtp-m/
66. www.evacuum.ru/upload/resize_cache/iblock/3ab/800_600_140cd750bba9870f18aada2478b24840a/3abaf1b34fe178812c7193bd2b6532e.jpg
67. www.gidromeh.ru/assets/files/5/PMT-2.pdf.
68. <https://elecsar.ru/production/preobrazovateli-monometricheskie/ptm-2>
69. https://tako-line.ru/catalog/vacuymnye_nasosy/sredstva_izmereniya_i_kontrolya_vacuuma/vacuumnoy_datchik_pirani_pvg_500_pvg_500s/
70. www.termodat.ru/catalog/dopolnitelnoe-oborudovanie/pmi-2/
71. https://intech-goup.ru/directions/vacuum/ionizacionnie_datchiki_s_katodom/igm_401_hornet/
72. https://intech-goup.ru/directions/vacuum/ionizacionnie_datchiki_s_katodom/BARION_XC/
73. Справочник по контролю промышленных шумов: Пер. с англ./ Пер. Л. Б. Скарина, Н. И. Шабанова; Под ред. В. В. Ключева. — М.: Машиностроение, 1979. — 447 с.
74. ДСН 3.3.6.037–99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. Затверджено постановою головного державного санітарного лікаря України № 37 від 01.12.1999 р.
75. ДСТУ ГОСТ 23941:2004. Шум машин. Методи визначення шумових характеристик. Загальні вимоги. Держспоживстандарт України, м.Київ. Чинний з 01.01. 2005 р.
76. <https://pribory-si.ru/catalog/3606/3344>
77. <https://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/shumomery/shumomer-vshv-003>
78. <https://standart-m.com.ua/p228820479-shumomer-rtf-00017.html>
79. www.atiss.ks.ua/product/shumomer-robotron-rft-00023.html
80. <https://zapadpribor.com/robotron-00024>
81. <https://harkov.flagma.ua/cifrovoy-shumomer-benetechn-gm1351-sr5451-o4219940.html>
82. <https://himstatus.com.ua/katalog/izmeritelnye-pribory/shumomery/tsifrovoy-shumomer-wintact-wt85-30-130-db>
83. www.techno-med.com.ua/shumomer-flus-mt-901a.html
84. <https://simvolt.ua/shumomr-walcom-ht-90a-ua.html>
85. <https://simvolt.ua/shumomr-kompaktniy-2-y-klas-tenmars-tm-102.html>
86. www.octava.info/octava-101A
87. www.octava.info/octava-110A

88. <https://ntm.ru/products/85/7373>
89. <https://ntm.ru/products/87/7380>
90. https://granat-e.ru/catalog_ishv.html
91. www.octava.info/ecophysica-110A
92. Диментберг Ф.М. Вибрация в технике и человек / Ф.М. Диментберг, К.В. Фролов / — М.: Знание, 1987. — 160 с.
93. Фандеев О. Cotton 100%, не враховуючи сліз і крові / О. Фандеев // Охорона праці. — 2013. — № 9. С. 38–39.
94. Методи і засоби захисту операторів машинно-тракторних агрегатів від вібрацій / Б.І. Кальченко, Н.М. Кириенко, Е.Н. Резников, Г.А. Устинов. — Київ: УМК ВО, 1991. — 200 с.
95. ДСН 3.3.6.039–99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації. Затверджено постановою головного державного санітарного лікаря України № 39 від 01.12.1999 р.
96. <https://simvolt.ua/vibrometr-vm-6360.html>
97. <https://setrix.ru/izmeritel-vibracii-tv-110.html>
98. www.ndt-club.com/product-430-tv110-vibrometr-portativnii.htm
99. <https://prom.ua/p635549545-vibrometr-benetechn-ar63b.html>
100. <https://standart-m.com.ua/izmeritelnye-pribory/vibrometry/vibrometr-pvt-5m>.
101. <https://prom.ua/p983828029-vibrometr-160a-vynosnym.html>
102. <https://prom.ua/p9399179-vibrometr-7m107v-795m107v.html>
103. <https://nktd.net/p9399179-vibrometr-7m107v-795m107v.html>
104. Контроль физических факторов окружающей среды, опасных для человека / Под ред. В.Н. Крутикова, Ю.И. Брегадзе, А.Б. Круглова. — М., Изд-во стандартов, 2003–517 с.
105. Метрологическое обеспечение безопасности труда / Колл. авт.; под ред. И.Х. Солодяна. Т.1. Измеряемые параметры физических опасных и вредных производственных факторов. — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 240 с.
106. ДБН В.2.5–28:2018. Державні будівельні норми. Природне і штучне освітлення. — Затв. наказом Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства від 3.10.2018 р., діє з 1.03.2019 р.
107. <https://prom.ua/p533545-lyuksmetr-walcom-1010bs.html>
108. <https://www.evm.ua/ljuksometru/ljuksometru-tenmars-tm202>
109. <https://simvolt.ua/lyuksmetr-led-tenmars-tm-201/-ru.html>
110. <https://simvolt.ua/lyuksmetr-led-tenmars-tm-209/-ru.html>

111. <https://simvolt.ua/lyuksmetr-neon-tenmars-tm-209n.html>
112. <https://simvolt.ua/lyuksmetr-led-tenmars-model-tm-209m.html>
113. www.ndt-geo.ru/product_1030.html
114. www.ndt-td.ru/katalog/izmereniya-tsveta-i-sveta/oborudovanie-dlya-izmereniya-osveschennosti/portativnie-yarkomeri/yarkomeri-ls-100ls-110.html
115. www.ndt-td.ru/katalog/izmereniya-tsveta-i-sveta/oborudovanie-dlya-izmereniya-osveschennosti/portativnie-yarkomeri/yarkomeri-ls-150ls-160.html
116. <https://granat-e.ru/jarm-3.html>
117. www.eksis.ru/catalog/tka/product4356.php
118. <https://standart-m.com.ua./izmeritelnye-pribory/luksmetry/luksmetr-yarkomer-tec-0693>
119. NIOSH[1972]. Criteria for recommended standard: occupational exposure to ultraviolet radiation. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health, Education and Welfare, Health Services and Mental Health Administration, National Institute for Occupational Safety and Health: DHEW(NIOSH) Publication NO. HSM 73-11009. (<https://www.cdc.gov/niosh/doch/1970/73-11009.html>)
120. СН 4557-88. Санитарные нормы ультрафиолетового излучения в производственных помещениях. Утв. зам. главного государственного санитарного врача СССР 23.02.1988 г.
121. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/94-2016-p>
122. www.laborkomplekt.ru/?page=7&sid=4&srid=56iid=1822
123. <https://prom.ua/p27642702-uvab-tenmars-213.html>
124. <https://tenzor.ua/products/izmerenie-opticheskikh-harakteristik/priboru-dlua-izmereniya-harakteristik-ultrafioletovogo-izlucheniya/tenzor-31>
125. <https://tenzor.ua/products/izmerenie-opticheskikh-harakteristik/priboru-dlua-izmereniya-harakteristik-ultrafioletovogo-izlucheniya/tenzor-71>
126. https://inpromsys.com.ua/catalog/special_instrumentation/spetsialnye-izmeritelnye-pribory/extech-uv510-izmeritel-ultrafioletovogo-izlucheniya.html
127. https://extech.com.ua/index.php?route=product/product&product_id=2558
128. <https://tenzor.ua/products/izmerenie-opticheskikh-harakteristik/priboru-dlua-izmereniya-harakteristik-infrakrasnogo-izlucheniya/radiometr-energeticheskoy-osveschennosti-rat-2p-f>

129. <https://zapadpribor.com/rat-2p-kvarts-41>
130. www.gigrometpribors.ru/PELENG-CF-12.html
131. www.vniiofi.ru/depart/m7/argus/argus03.html
132. https://ntm.ru/UserFile/product/teplovoe_izluchenie/IK-metr_manual.pdf
133. СН 2392–81. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров. Утв. главн. государственным санитарным врачом СССР 21.04.1981 г.
134. СанПиН 5804–91. Санитарные нормы и правила устройства и эксплуатации лазеров. Утв. главн. государственным санитарным врачом СССР 31.07.1991 г.
135. ГОСТ 12.1.040–83*.ССБТ. Лазерная безопасность. Общие требования. Введ. 01.01.1984 г.
136. ГОСТ 12.1.031–81.ССБТ. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения. Введ. 01.01.1982 г.
137. Наказ «УкрНДЦ» від 25 грудня 2015 р. №209«Про скасування національних стандартів, які розроблені на основі міждержавних стандартів, що розроблені до 1992 року та скасування міждержавних стандартів в Україні, що розроблені до 1992 року». (csm.kiev.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=3680%3A2015-&catid=125%3A2016-10-17-07-47-05&Hemid=89&land=uk)
138. www.mashprom.com.ua/лазерный-дозиметр-ладин/
139. www.orbitalspb.ru/dozimetr_Ladin_passport.pdf
140. <https://all-pribors.ru/opisanie/54480-13-ld-07-58060>
141. <https://printsip.ru/dozimetry-i-radiometry/item/ld-07>
142. https://granat-e.ru/ild_2m.html
143. www.momm.com.ua/izm/647-izmeritel-moschnosti-lp1.html
144. <https://micromir.ucoz.ru/Laser/ORM-572MD.pdf>.
145. <https://eurosmed.ru/products/izmeritel-moschnosti-impulsnogo-i-nepreryvnogo-izlucheniya-imi-01>
146. <https://zapadpribor.com/rbk-7101-izmeritel/>
147. Чинков В. М. Основы метрологии та вимірювальної техніки: навч. посіб. — 2-ге вид., перероб. і доп. — Харків: НТУ «ХПІ», 2005. — 524 с.
148. ДСНіП 3.3.6.096–2002. Державні санітарні норми та правила при роботі з джерелами електромагнітних полів. Затв. наказом Міністерства охорони здоров'я України від 18.12.2002. Діє з 1.04.2003 р.
149. https://pragmatic.com.ua/gigahertz_solutions_hf32d
150. <https://simvolt.ua/radiochastotnyy-analizator-hf-58b.html>
151. <https://simvolt.ua/komplekt-35c-ru.html>

152. <https://tenzor.ua/products/elektricheskie-i-magnitnue-polya/pribory-dlya-izmereniya-elektromagnitnogo-polya/p3-33m-density-meter-flow-of-the-electromagnetic-field>
153. <https://simvolt.ua/nabor-radiochastotnyy-analizator-hfw-59d-s-vysokochastotnym-usilitelem-hv20.html>
154. <https://elaso.com.ua/products/0-kontrolno-izmeritelnye-pribory/14-izmeriteli-elektromagnitnogo-polya/name/2187-att-2592>
155. https://elpriz.ru/cgi-bin/catalog/viewpos.cgi?in_id=3656
156. <https://electronpribor.ru/catalog/56/tm-190.htm>
157. <https://ntm.ru/products/44/8310>
158. Кулаков О. В. Електротехніка та пожежна профілактика в електроустанов-ках: навч. посіб. О. В. Кулаков, В. О. Росоха. — Харків, 2003. — 362 с.
159. <https://eandc.ru/catalog/detail.php?ID=11086>
160. <https://pribor-59.ru/ampermetry-laboratornye/ampermetr-laboratornyj-e514.html>
161. <https://electronpribor.ru/catalog/247/d5100.htm>
162. <https://zapadpribor.com/m4200>
163. <https://zapadpribor.com/m4231-62>
164. <https://asenergi.com/catalog/pribory-schitovye/ampermetry-m42300.html>
165. <https://zapadpribor.com/m42243>
166. <https://zapadpribor.com/e514>
167. <https://zapadpribor.com/e4200>
168. <https://zapadpribor.com/e350>
169. https://standart-m.com.ua/elektroizmeritelnoe-oborudovanie/laboratornyye-priboru/ampermetri_laboratornie/ampermetr-d5099_-d5100_-d5101
170. <https://zapadpribor.com/d5014/>
171. <https://zapadpribor.com/V2-36-voltmetr/>
172. <https://mp16.ru/blog/millivoltmetr-v3-38/>
173. <https://zapadpribor.com/v2-43>
174. <https://armadatest.net/product/v2-38>
175. <https://zapadpribor.com/V2-38/>
176. https://rw6ase.narod.ru/prib/w3_38.jpg
177. <https://zapadpribor.com/v7-35>
178. <https://ntc-alkat.ru/product/voltmetr-cifrovoj-v7-35/>
179. https://priborsnab.com.ua/sat_119.html
180. <https://rllocman.ru/op/toval.html?di=67892&/V7-64M>

181. <https://priborelektro.ru/product/foreignprice/voltmetry-5/4312.html>
182. https://electronpribor.ru/catalog/76/v7-78_1.htm#specification
183. <https://investpp.ru/toval/megaommetr-es0202-1-2g/>
184. <https://electronoff.ua/good/megaommetr-benetechn-gm3125-izmeritel-soprotivleniya-izolyatsii.php>
185. https://izmerimvse.ua/izmeriteli_soprotivleniya_izoljacii_meegommetry.aspx
186. <https://electronpribor.ru/catalog/7/ms5205.htm#specification>
187. <https://zapadpribor.com/mo-61/>
188. <https://zapadpribor.com/mo-62/>
189. <https://zapadpribor.com/r329/>
190. <https://zapadpribor.com/r333/>
191. <https://zapadpribor.com/r4053/>
192. <https://zapadpribor.com/r4060/>
193. <https://zapadpribor.com/bm-509/>
194. <https://zapadpribor.com/e7-20/>
195. <https://astena.ru/e7-20.html>
196. <https://cem-instruments.ru/multimetri-cifrovie/dt-9930-professionalnij-lcr-metr>
197. <https://micromir-nn.ru/publ/236-1-0-1790>
198. <https://radio-shop.com.ua/izmeritel-rlc-uni-t-utm1611-ut611>
199. <https://prom.ua/p113078485-izmeritel-rlc-uni.html>
200. https://pribor-servis.ru/catalog/radioizmeritelnye-pribory/lzm_RLC/amprobe-lcr55a.htm
201. <https://pribory.com/product/portativny-j-lcr-metr-sanva-lcr700/>
202. <https://pribor-servis.ru/catalog/elektroizmeritelnye-pribory/Ommetry/ms-08-izmeitel-zazemleniya.htm>
203. <https://electrokit.by/ut522-izmeritel-soprotivleniya-zazemleniya-uni-t/p233>
204. <https://prom.ua/p360057960-tester-zazemleniya-uni.html>
205. <https://prom.ua/p187683815-ut275-utm-1275.html>
206. <https://etalonpribor.com.ua/f4103-m1-izmeritel-coprotivleniya-zazemlenii.html>
207. <https://gsmserver.com.ua/uk/earth-tester-hioki-hitester-3143/>
208. <https://simvolt.ua/izmeritel-soprotivleniya-zazemlensya-cem-dt-5300b.html>
209. <https://simvolt.ua/p819189851-tester-oporu-zazemlensya.html>
210. <https://electro-boom.kh.ua/chastotomer-shchitovoy-analogovyy-peremennogo-toka-ed2230/>
211. <https://zapadpribor.com/d506/>

212. <https://zapadpribor.com/d126/>
213. <https://ross.com.ru/chastotomer-f-5043/>
214. <http://printsip.ru/radioizmeritelnye-pribory/chastotomery-standarty-chastoty/chastotomery-izmeriteli-vremennykh-parametrov-ch3/item/f5043>
215. <https://zapadpribor.com/f433-3/>
216. <https://zapadpribor.com/f5311/>
217. <https://standart-m.com.ua/elektroizmeritelnoe-oborudovanie/laboratornyye-priboru/chastotomery/chastotomer-ch3-54?mova=uk>
218. <https://zapadpribor.com/ch3-54/>
219. <https://zapadpribor.com/ch3-63/>
220. <https://elpribor.ru/catalog/53/1533/>
221. <https://contragent.kh.ua/chastotomer-cifrovoj-schitovoj-cch0205-3>
222. https://megommetr.com/index.php/produktsiya/product/3-izmeritel-tsch0205-3/category_pathway-30
223. https://etpribor.ru/product_info.php?products_id=25
224. <https://astena.ru/ch3-64.html>
225. https://mzpo.com.ua/catalogue/chastotomery/pendulum_chastotomeri/927pendulum-cnt-90-chastotomer.html
226. https://prist.ru/chastotomery/cnt_90/
227. <https://astena.ru/1856d.html>
228. https://eliks.ru/index.php?SECTION_ID=1192&ELEMENT_ID=24282
229. <https://prom.ua/p591690377-tsifrovoj-chastotomer-zhaoxin.html>
230. <https://micromir-nn.ru/publ/191-1-0-1205>

На обкладинці у верхньому ряду зліва направо зображено: аналоговий мегаомметр ЕС0202/2-Г[183]; щитовий частотомір ІЦЦ 120[220]; радіочастотний аналізатор HF-58В[150].

У нижньому ряду зліва направо зображено: яскравомір Konica Minolta LS-100[114]; цифровий диференційний манометр GM 520[63]; люксметр для вимірювання рівнів освітленості від світлодіодних джерел світла Tenmars Electronics TM-209M[112]; термомікрометр Fluke-971[54]; віброметр TV 110[97]; пірометр ADA TemPro 2200[15].

Навчальне видання

ЯЩЕРЦІН
Євген Володимирович

**ПРИЛАДИ КОНТРОЛЮ ШКІДЛИВИХ ТА НЕБЕЗПЕЧНИХ
ВИРОБНИЧИХ ФАКТОРІВ**

Текст лекцій
для студентів за напрямом підготовки 263 «Цивільна безпека»

Відповідальний за випуск	проф. Березуцький В. В
Роботу до видання рекомендувала	проф. Пономаренко О. І.
Редактор	Н. В. Верстюк

План 2018 р., поз. 90

Підп. до друку 22.10.2020 р. Формат. 60х84/16 Папір офісний.
Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 20.93
Наклад 25 прим. Зам. № 2115223.

Редакційно-видавничий центр НТУ«ХП», Харків-2, вул.Кирпичова, 2
Свідоцтво про державну реєстрацію ДК №5472 від 21.08.2017 р.

Видавець ТОВ «ПЛАНЕТА-ПРІНТ»
вул. Багалія, 16, м. Харків, 61002,
свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4568 від 17.06.2013.

Виготовлювач ФЛ-П Черняк Л. О.
61002, м. Харків, вул. Багалія, 16
Свідоцтво № 24800000000079553, від 16.05.2007 р.



Ящеріцин Євген Володимирович

Фахівець з охорони праці, безпеки життєдіяльності та матеріалознавства, кандидат технічних наук, доцент кафедри "Безпека праці та навколишнього середовища" Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". У 2010 році захистив дисертацію на здобуття наукового ступеня кандидат технічних наук на тему "Структура та механічні властивості багатошарових композитів мідь – тантал, отриманих методом дифузійного зварювання".

Автор більш як 50 наукових публікацій з матеріалознавства, охорони праці та безпеки життєдіяльності.