ВСТУП 6

1. ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ТА ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ВЕЛИЧИН 7
   1. Основні поняття та визначення 7
   2. Засоби й методи вимірювань 10
   3. Основні властивості вимірювальних приладів 10
   4. Класифікація приладів для теплотехнічних вимірювань 11
   5. Види засобів вимірювань 11
   6. Похибки вимірювань та похибки засобів вимірювань 14
   7. Повірка вимірювальних приладів 22
   8. Метрологічні характеристики засобів вимірювань 23
2. ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ 23
   1. Температура як характеристика термодинамічного стану 24
   2. Міжнародна температурна шкала 25
   3. Класифікація приладів для вимірювання температури 27
   4. Рідинні термометри розширення 28
   5. Дилатометричні (dilatometric) й біметалічні термометри 31
   6. Манометричні термометри 32
   7. Термоелектричні термометри 34
   8. Компенсаційні дроти 38
   9. Методи вимірювання термо-е.р.с 39
   10. Термометри опору та методи вимірювання опорів 43
   11. Способи підключення термометрів опору 44
   12. Логометр 46
   13. Пірометри 48
3. МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ. ТЕПЛОМІРИ 50
   1. Використання енергії зміни агрегатного стану 51
   2. Рідинно-ентальпійний метод 51
   3. Електрометричний метод 52
   4. Евапорографічний метод 54
   5. Пневматичний і оптичний методи 55
   6. Інерційні тепломіри 56
   7. Фотоелектричні і радіометричні тепломіри 56
   8. Компенсаційні радіометри 57
   9. Метод допоміжної стінки 57
   10. Тепломіри з поперечною складовою потоку 57
   11. Аналітичні методи 58
   12. Піроелектричні тепломіри 58
4. МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

РІЗНИЦІ ТИСКІВ ТА РОЗРІДЖЕННЯ 59

4.3 Мікроманометри 63

* 1. Пружні чутливі елементи 65
  2. Прилади прямої дії для вимірювання тиску 67
  3. Прилади тиску електричні. П'єзоелектричні манометри 68
  4. Манометри опору 69

1. ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ ТА КІЛЬКОСТІ РЕЧОВИНИ 70
   1. Види витрат і витратомірів 70
   2. Вимірювання витрат й кількості рідин за перепадом тиску в звужуючому пристрої. Методика використання звужуючих пристроїв 71
   3. Вимірювання швидкостей і витрати напірними трубками 78
   4. Витратоміри постійного перепаду тиску 79
   5. Тахометричні витратоміри, лічильники кількості та електромагнітні витратоміри 81
   6. Об’ємні витратоміри 85
   7. Електромагнітні витратоміри 86
   8. Ультразвукові витратоміри 88
   9. Оптичні (лазерні) витратоміри 89
   10. Вимірювання витрат методом контрольних „міток" 90
   11. Відцентрові витратоміри 91
   12. Вихрові витратоміри 92
   13. Гідродинамічні витратоміри 92
   14. Калориметричні й термоанемометричні витратоміри. 93
2. ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИН ТА СИПКИХ ТІЛ 93
   1. Рівнеміри з візуальним відліком 94
   2. Механічні рівнеміри 95
   3. Дифманометричні рівнеміри 99
   4. Акустичні рівнеміри 100
   5. Електричні рівнеміри 103
   6. Оптичні рівнеміри 105
   7. Теплові рівнеміри 106
   8. Вимірювання рівня сипких тіл 108
3. ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТІЛ І СЕРЕДОВИЩ 108
   1. Основні поняття та визначення 109
   2. Методи вимірювання вологості повітря і газу 110
   3. Метод точки роси 113
   4. Методи вимірювання вологості твердих і сипучих тіл 116
4. АНАЛІЗ СКЛАДУ ГАЗІВ 118
   1. Класифікація газоаналізаторів 118
   2. Об'ємні хімічні газоаналізатори 119
   3. Теплові газоаналізатори 122
   4. Термо-кондуктометричні газоаналізатори 122
   5. Магнітні газоаналізатори 124
   6. Оптичні газоаналізатори 125
   7. Хроматографічні газоаналізатори 126

ЛІТЕРАТУРА 129

ГЛОСАРІЙ 130

**ВСТУП**

Однією із глобальних світових проблем сьогодення є економія енерго- ресурсів, залучення в сферу їх виробництва нетрадиційних джерел, впро- вадження енергозбережних технологій. Важливе місце в теплотехнологіч- них процесах, які застосовують у хімічній, фармацевтичній, деревооброб- ній та інших галузях промисловості України займають вимірювання та ко- нтроль параметрів процесів, на які витрачається значна кількість коштів, призначених для забезпечення якості, надійності, безпеки проходження теплотехнологічного процесу.

Спеціаліст-теплоенергетик незалежно від профілю його практичної роботи повинен мати досить глибокі знання в області теорії та практики вимірювань основних теплотехнологічних параметрів процесів, таких як температура, тиск, витрата тощо та вміти їх використовувати в своїй про- фесійній діяльності.

Написання даного навчального посібника зумовлено кількома причи- нами. Головна з них – відсутність необхідних підручників і посібників, тим більше, українською мовою. Крім того, слід враховувати те, що в наш час парк вимірювальної техніки досить швидко змінюється і прилади, котрі широко використовувались ще десять років назад, зараз вже є технічно і морально застарілими. Тому в посібнику основна увага приділялась фун- даментальним основам методики вимірювання фізичних величин в теплое- нергетичних та теплотехнічних процесах, викладені особливості компону- вання первинних та вторинних засобів вимірювання для досягнення досто- вірного результату вимірювань.

Скорочення лекційних годин віддає пріоритетну роль самостійній під- готовці студентів, яка стає одним із головних засобів професійної підгото- вки. Це потребує відповідного методичного забезпечення під час виконан- ня самостійної роботи і курсового проектування, особливо для студентів заочної форми навчання

Посібник розроблений у відповідності з програмами дисциплін "Теп- лотехнічні вимірювання та прилади", спеціальності 6.050601 та "Теплотех- нічні вимірювання" спеціальності 6.000008 і може бути використаний як для вивчення дисципліни студентами стаціонарної форми навчання так і для дистанційного навчання студентів заочної форми навчання.

Автор вдячний рецензентам та колективам кафедр "Теплоенергетика" та "Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології" за корисні за- уваження і поради в процесі підготовки посібника.

# 1 ЗАГАЛЬНІ ПОНЯТТЯ ТА ПРИНЦИПИ ВИМІРЮВАНЬ ТЕПЛОТЕХНІЧНИХ ВЕЛИЧИН

* 1. Основні поняття та визначення

В основі безпечної й економічної роботи теплових об’єктів лежать вимірювання теплотехнічних параметрів.

Одержання значення фізичної величини дослідним шляхом за допо- могою спеціальних технічних засобів називають *вимірюванням* (measure- ment)*.* У цьому визначенні під терміном *«*фізична величина*»* розуміють властивість, загальну в якісному відношенні багатьом фізичним об'єктам, але в кількісному відношенні індивідуальну для кожного об'єкта.

Вимірювання любої фізичної величини полягає в порівнянні її з ін- шою однорідною (homogeneous) величиною, умовно прийнятою за одини- цю. Отже, результат вимірювання U показує чисельне співвідношення між вимірюваною величиною Q і одиницею вимірювання q, тобто виражається рівністю

*Q=qU*. (1.1)

Теплотехнічні вимірювання служать для визначення багатьох фізич- них величин, пов'язаних із процесами генерації, перетворення й споживан- ня (витрат) теплової енергії. До них відноситься визначення як чисто теп- лових (температури, теплоємності (heat capacity), ентропії), так і пов'яза- них з ними інших фізичних величин (тиску, витрат (consumption), рівня (pitch) тощо).

За способом отримання числового значення вимірюваної величини теплотехнічні вимірювання розділяють на прямі й непрямі.

*Прямі -* це вимірювання, при яких шукане значення (value required it) фізичної величини визначають безпосередньо з дослідних даних (напри- клад, вимірювання температури термометром розширення або вимірюван- ня тиску мембранним манометром). Якщо позначити через [X] одиницю вимірюваної величини, а через х її числове значення, то шукане значення вимірюваної величини Q=x[X].

*Непрямі* – це вимірювання, при яких шукану величину знаходять на підставі відомої залежності між цією величиною й величинами, що одер- жані в результаті прямих вимірювань. У цьому випадку вимірювана вели- чина визначається функціональною залежністю К= f(X1, Х2, . . ., Хn), де Х1, Х2, . . ., Хn - значення величин, що виміряні прямим способом. Непрямими вимірюваннями є визначення витрат рідин або газів, коефіцієнта корисної дії (ККД), питомих економічних показників обладнання, різних неелектри-

чних величин (тиску, температури), перетворених в електричні вимірювані сигнали.

В лабораторній практиці розрізняють також *спільні* та *сукупні* вимі- рювання.

Спільні вимірювання (сommon measurement) - проведені одночасно вимірювання двох або декількох неодноіменних величин для визначення за- лежності між ними.

Сукупні вимірювання (total measurement) - проведені одночасно вимі- рювання кількох однойменних величин, при яких шукані значення величин визначають шляхом розв'язання системи рівнянь, одержуваних при вимірю- ванні цих величин в різних поєднаннях.

Вимірювання проводяться на основі фізичних явищ, що визначають *принцип вимірювання* (principle of measurement), наприклад: вимірювання тем- ператури за розширенням речовини. Для реалізації тих чи інших принципів вимі- рювання використовуються ті чи інші технічні засоби. Технічний засіб, що вико- ристовується у вимірюваннях і має нормовані метрологічні властивості, назива- ється *засобом вимірювання* (measuring device). Сукупність правил, що визнача- ють принципи і засоби вимірювання називають *методом вимірювання* (method of measuring). Існує ряд методів, з яких найбільш поширеними є:

* *метод безпосередньої оцінки* – передбачає визначання шуканої вели- чини за відрахунковим пристроєм вимірювального приладу, наприклад, за положенням стрілки манометра відносно його шкали.
* *метод порівняння з мірою* полягає в тому, що вимірювальна величи- на порівнюється із значенням що відтворюється мірою для даної вели- чини, наприклад вимірювання довжини метром.
* *диференціальний метод* передбачає дію на прилад різниці вимірюва- ної і базової (значення якої відоме) величин (наприклад вимірювання складу газової суміші за теплопровідністю, якщо відома теплопровід- ність повітря). Метод дозволяє отримати високу точність вимірювань навіть для використання приладів з не дуже високою точністю, однак вимагає наявності базової величини, значення якої близьке до вимірю- ваної величини і відоме з високою точністю.
* *нульовий метод* є різновидністю методу порівняння з мірою. Тут ре- зультуюча дія двох величин (вимірюваної і відтвореної мірою), напра- влених назустріч одна одній доводиться до нуля. Приклад – вимірю- вання маси на терезах.

При вимірюваннях фізичних величин ніколи не можна одержати їх- нього істинного значення, що пов'язане з недосконалістю методів і засобів вимірювань, із впливом умов вимірювань, а також індивідуальними особ-

ливостями спостерігачів тощо.

Відхилення (deviation) результату вимірювання від істинного зна- чення вимірюваної величини називають *похибкою вимірювання.*

Зі зменшенням похибки вимірювань підвищується їхня точність. Якість вимірювань, що відображає близькість їхніх результатів до істинно- го значення вимірюваної величини, називають *точністю вимірювань.* Для конкретних умов і цілей вимірювання існує свій раціональний рівень точ- ності, що недоцільно перевищувати через складність відповідних вимірю- вань.

*Єдність вимірювань -* це стан вимірювань, при якому їхні результати виражені в узаконених одиницях, а похибки відомі із заданою ймовірністю. Питаннями теорії й практики забезпечення єдності й необхідної точності вимірювань займається метрологія.

*Система одиниць* (system of units) повинна мати наступні властивос- ті: універсальність (метод побудови системи не пов'язаний з конкретними фізичними величинами); мінімальну кількість основних одиниць (необхід- ну для утворення логічно несуперечливих похідних одиниць, що охоплю- ють всі види вимірювань); незалежність вибору основних одиниць від їхніх кількісних значень (наприклад, як одиниця довжини вибирають будь-яку - метр, дюйм, сажень, при цьому похідні одиниці залежать від обраної осно- вної).

Спочатку застосовувалися системи одиниць, у яких основними були три одиниці: довжини, маси й часу.

Вони охоплювали широке коло завдань механіки. Велике поширення одержали системи одиниць МКС (метр - кілограм - секунда) і СГС (санти- метр - грам - секунда). Оскільки системи механічних одиниць не охоплю- вали теплотехнічні, до них додали ще одну основну одиницю - градус тем- пературної шкали (системи МКСГ), а для електричних і магнітних вимі- рювань - одиницю сили струму - ампер (система МКСА).

Існування різних систем одиниць фізичних величин і великої кількості додаткових одиниць, ріст науково-технічного прогресу і економічних зв'язків між країнами висунули вимогу уніфікації одиниць виміру в міжнародному масштабі. В 1960 р. XI Генеральна конференція з мір і вагів затвердила про- ект Міжнародної системи фізичних одиниць СІ, що знайшов відбиття в реко- мендаціях Міжнародної організації по стандартизації (ІSО). В 1961 р. Комітет стандартів, мір і вимірювальних приладів при Раді Міністрів СРСР розробив і випустив ДЕРЖСТАНДАРТ 9867-61, яким затверджувалася система СІ у всіх галузях науки й техніки, а також при навчанні.

Основними одиницями СІ є: довжина - метр (м); маса - кілограм (кг);

час - секунда (с); термодинамічна температура - Кельвін (К); сила електри- чного струму - ампер (А); кількість речовини - моль; сила світла - кандела (кд), додатковими одиницями - плоский кут-радіан (рад) і тілесний кут - стерадіан (ср).

Всі інші одиниці фізичних величин у СІ - похідні. Вони утворюються за допомогою найпростіших рівнянь, які відбивають їхній зв'язок з основ- ними одиницями системи. Коефіцієнт пропорційності в цих формулах до- рівнює *одиниці,* що є перевагою СІ перед іншими системами. Цю власти- вість системи називають *когерентністю.*

У СІ похідну одиницю знаходять за розмірностями (dimension) основ- них одиниць. Наприклад, у СІ одиниця сили Р=mа, (m - маса тіла, а - його прискорення) має наступну розмірність: [F]=[m][a]: [кгмc-2].

* 1. Засоби й методи вимірювань

Всі вимірювання виконують за допомогою технічних засобів, які ма- ють нормовані похибки й називаються *засобами вимірювань.* Вони є мате- ріальною основою вимірювань фізичних величин. Сукупність (totality) прийомів використання принципів і засобів вимірювань називається *ме- тодом вимірювань.*

Засоби вимірювань повинні мати нормовані метрологічні характери- стики, тобто визначені числові значення величин і властивостей, що ви- значають точність і достовірність результатів вимірювань. Засіб вимірю- вання, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації в формі, зручній для безпосереднього сприйняття спостерігачем називається вимірювальним приладом. Їх ділять на *аналогові і цифрові*. В *аналогових* – показання є неперервною функцією зміни вимірюваної величини. В *циф- рових* – показання представлені в цифровій формі, яка є результатом дис- кретного перетворення сигналів вимірювальної інформації. Прилади бу- вають *показуючі* (значення зчитуються з шкали або табло) і *реєструючі* (значення записуються на діаграмній стрічці або друкуються в цифровій формі).

До основних видів засобів вимірювань відносять міри, вимірювальні перетворювачі, вимірювальні прилади, інформаційно-вимірювальні системи.

* 1. Основні властивості вимірювальних приладів

Точність (precision) визначається ступенем достовірності показів приладу, тобто тим, наскільки результати вимірювань відрізняються від

істинних значень вимірюваної величини.

Чутливість (sensitivity) виражається відношенням лінійного або ку- тового переміщення покажчика до зміни вимірюваної величини, що викли- кала це переміщення. Якщо l – переміщення покажчика приладу, а Х – відповідна зміна вимірюваної величини, то чутливість визначають як: S=l/X.

Швидкодія (performance) приладу залежить від його інерційності, що викликає запізнювання показів.

Надійність (reliability) характеризує властивість приладу зберігати роботоспроможність (ability to work) протягом заданого часу. Це стан при- ладу, в якому він може виконувати свої функції у відповідності з встанов- леними для нього технічними вимогами.

* 1. Класифікація приладів для теплотехнічних вимірювань

Основна класифікація ділить прилади за родом вимірюваних величин:

* температури: термометри і пірометри (pyrometers);
* тиску: манометри, вакуумметри, мановакуумметри, тягонапороміри і барометри;
* витрати і кількості: витратоміри, лічильники (counters), ваги;
* рівня рідин і сипучих тіл: рівнеміри і покажчики рівня;
* складу газів: газоаналізатори, психрометри (psychrometers), гігромет- ри, вологоміри;
* якості води і пари: кондуктоміри і киснеміри.
  1. Види засобів вимірювань

*Міра -* засіб вимірювань, призначене для відтворення одного або декі- лькох відомих значень фізичної величини. Наприклад, гиря - міра маси, температурна лампа - міра яскравісної або колірної температури, вимірю- вальна колба (bulb) - міра об'єму. Перераховані міри відтворюють одне значення фізичної величини, тобто є *однозначними.* До цих мір відносять також зразкові речовини. Міри, що відтворюють кілька значень фізичної величини (наприклад, лінійка, конденсатор змінної ємності, змінний опір), називають *багатозначними.* Поряд з мірами існують *магазини мір,* тобто їхні набори, у яких міри об'єднані в єдине конструктивне ціле із пристроєм для їхнього з'єднання в різних сполученнях (магазин опорів, магазин інду- ктивностей).

Фізичні величини вимірюють мірами методом порівняння. У деяких

випадках використовують метод протиставлення (наприклад, вимір маси на рівноплечих вагах гирями) або метод збігу (вимірювання довжини лінійкою). *Вимірювальний перетворювач -* засіб вимірювань, призначений для вироблення сигналу вимірювальної інформації у формі, зручної для передачі, подальшого перетворення, обробки й зберігання, але не

піддається безпосередньому сприйняттю спостерігачем.

Ці перетворювачі є складовими частинами приладів і вимірювальних систем. По місцю, що займається в приладах, вимірювальні перетворювачі розділяють на первинні, проміжні, масштабні. *Первинним перетворювачем* називається пристрій, до якого підводиться безпосередньо вимірювана фі- зична величина, тобто він знаходиться першим у вимірювальному колі.

Часто такі перетворювачі називають *датчиками* (наприклад, термое- лектричний термометр, звужуючий пристрій витратоміра).

Перетворювач, що займає у вимірювальному колі місце після первин- ного, називають *проміжним*.

Перетворювач, призначений для зміни величини в задану кількість ра- зів, називають *масштабним* або *підсилювальним* (наприклад, вимірюваль- ний трансформатор струму, дільник напруги, вимірювальний підсилювач), а призначений для дистанційної передачі сигналу вимірювальної інформа- ції - *передавальний* (наприклад, індуктивний або пневматичний перетво- рювач).

Останнім часом у зв'язку із застосуванням у вимірювальній техніці рі- зних ЕОМ і мікропроцесорів дістали поширення аналого-цифрові (АЦП) і цифроаналогові перетворювачі (ЦАП). Перші перетворювачі слугують для перетворення аналогових сигналів у цифрові, що змінюються дискретно в часі з постійним кроком, другі - для перетворення дискретних за часом си- гналів в аналогові. У теплотехнічних вимірах найчастіше застосовують АЦП.

Нелінійна залежність в перетворювачах допускається у виняткових випадках.

*Вимірювальний прилад* - засіб вимірювань, призначений для вироб- лення сигналу вимірювальної інформації у формі, придатної для безпосе- реднього сприйняття спостерігачем. Цей вид засобів вимірювань найчас- тіше використовують при експлуатації енергетичного обладнання. На від- міну від міри вимірювальний прилад не відтворює значення вимірюваної величини, вона підводиться до приладу ззовні. Прилад видає в процесі ви- мірювань числове значення величини.

Вимірювальний прилад, показання якого є безперервною функцією змін вимірюваної величини, називають *аналоговим*, а прилад, показання

якого представлені у вигляді цифр - *цифровим*.

За способом побудови вимірювальної схеми розрізняють *прилади прямої дії*, *порівняння*, *автоматичної компенсації*

Для аналогових вимірювальних приладів характерні відлікові пристрої, що складаються зі шкали й покажчика (designator).

Сукупність послідовно нанесених оцінок, що відповідають ряду зна- чень вимірюваної величини, називають *шкалою.* Відстань між двома сусі- дніми позначками називають *довжиною поділки* шкали, а різниця між зна- ченнями цих позначок - *ціною поділки шкали*

Область показань шкали, обмежену її кінцевим і початковим значен- нями, називають діапазоном вимірювань, а найбільше й найменше значен- ня діапазону - відповідно верхньою й нижньою межами вимірювань.

Числові позначки на шкалах звичайно позначають розмір вимірюваної величини. Іноді на шкали наносяться відсотки або їхні частки.

Нанесення позначок на шкалу за дійсним значенням вимірюваної ве- личини називають *градуюванням.* Значення величини, позначені на шкалі приладу, зазвичай кратні п'яти.

У цифрових вимірювальних приладах (ЦВП) шкала й вказівник відсу- тні. Результат вимірювання зчитують по цифрах вихідного коду

Однієї з найважливіших характеристик вимірювального приладу є *чу- тливість -* відношення зміни сигналу на виході вимірювального приладу до викликаючої її зміни вимірюваної величини

Іншою важливою характеристикою вимірювального приладу є *варіа- ція показань -* варіація виникає через тертя в опорах рухливих частин при- бору, гістерезису пружин і пружних елементів. При експлуатації приладу варіація збільшується. Найбільше значення варіації показань не повинне перевищувати припустимої похибки приладу.

Для оцінки похибки приладів використовується така узагальнена хара- ктеристика, як *клас точності* (accuracy class)*.* Якщо межі основної допус- тимої похибки, задані абсолютною похибкою в одиницях вимірюваної ве- личини, клас точності приладу позначають «Кл 1» або «Кл 2». У цьому ви- падку він носить умовний характер і не має зв'язку з конкретним значенням похибки приладу. Чим менший клас точності приладу, тим він точніший.

Набагато частіше для нормування похибки приладу використовують клас точності К, пов'язаний з конкретним значенням абсолютної похибки АХ = + КХN /100, де ХN – нормоване значення шкали приладу. Це значення приймається рівним: верхній межі вимірювань (Хв) — для прила- дів з однобічною шкалою; арифметичній сумі верхньої й нижньої меж ви- мірювань |ХН|+|ХВ| – для приладів із двосторонньою шкалою; різниці верх-

ньої й нижньої меж (Хв – ХН) – для приладів з безнульовою (no zero) шка- лою; значенню XN, зазначеному в паспорті, – для приладів фізико- хімічного аналізу речовин, ЦВП.

Клас точності приладу задається будь-яким числом з розмірного ряду (1; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 10n, де n=1; 0; -1; -2.

В залежності від призначення і ролі, яку прилади виконують в про- цесі вимірювання, засоби вимірювання діляться на:

* + еталони: служать для поновлення і зберігання одиниць фізичних величин і передачі їх розмірів через зразкові робочим засобам вимірювань;
  + зразкові: призначені для передачі розмірів одиниць фізичних вели- чин від еталонів або інших точних засобів вимірювань робочим засобам вимірювань. За зразковими засобами повіряються та градуюються робочі засоби вимірювань;
  + робочі: призначені для практичних вимірювань у всіх галузях н/г. Їх ділять на засоби вимірювань підвищеної точності і технічні.

Кожному типу вимірюваних приладів відповідають певні класи точ-

ності.

* 1. Похибки вимірювань та похибки засобів вимірювань

Вимірювання фізичних величин не може бути зроблене абсолютно точно внаслідок недосконалості методів і засобів вимірювань, а також че- рез вплив умов вимірювання, індивідуальних особливостей спостерігача випадкових причин тощо.

Виникаючі при цьому відхилення результатів вимірювань від істин- них значень вимірюваної величини називаються похибками вимірювань.

Для кожного вимірювання повинна бути відома ступінь точності йо- го результату, що оцінюється похибкою вимірювань. Тільки тоді отримане значення тієї чи іншої величини має практичний сенс. Похибка вимірю- вання може бути виражена у виді абсолютної чи відносної величини і бу- ває додатною чи відємною.

Абсолютна похибка (absolute error) , що виражається в одиницях вимірювань, є різницею між виміряним значенням (показанням приладу) х і дійсним значенням вимірюваної величини Хд, хоча теоретично при ви- значенні похибки вимірювання замість дійсного значення вимірюваної ве- личини Хд повинне вказуватися істинне її значення X.

При цьому під дійсним значенням розуміють значення вимірюваної величини, знайдене експериментально (наприклад, за допомогою зразково- го приладу) і настільки наближене до істинного, що для даної мети може

бути використане замість нього. Внаслідок неможливості створення ідеа- льних методів і засобів вимірювань істинне значення не може бути визна- чено, тобто воно завжди залишається невідомим.

Відносна похибка (relative error) , що вказується у відсотках, є від- ношенням абсолютної похибки до дійсного значення, тобто

 = х - Хд, (1.2)

  

Хд

100 . (1.3)

Як правило, для визначення дійсного значення до показів приладу вводяться поправка с, що чисельно дорівнює абсолютній похибці, взятій зі зворотним знаком

  ∓с . (1.4)

Поправка алгебраїчно складається з результатом вимірювання

Хд = х + (с). (1.5)

Іноді для одержання точного результату показання приладу збіль- шуються на поправочний множник к, тобто

Хд = кх . (1.6)

Значення , с, і к в більшості випадків знаходяться дослідним шля-

хом.

Для стаціонарних промислових вимірювань застосовуються прилади,

найбільші похибки яких знаходяться в межах існуючих норм (стандартів), що задовольняють вимогам практики. Тому до показань цих приладів поп- равки не вводяться.

Для лабораторних і точних промислових вимірювань враховуються за можливістю усі виникаючі похибки. У цих випадках відлік показань приладу виконується кілька разів підряд з метою визначення середнього значення вимірюваної величини, вірогідність якого зростає із збільшенням числа відліків.

Всі похибки за характером прояву в результаті вимірювань діляться на систематичні, випадкові й грубі.

* + 1. Систематичні похибки

Основним видом похибки в теплотехнічних вимірюваннях є система- тична похибка, що залишається постійної або закономірно змінюється при повторних вимірюваннях однієї й тієї ж величини. Цю похибку усувають або введенням поправок, або вдосконалюванням процесу вимірювання. по- правка, рівна систематичної похибки по величині й зворотна за знаком, до- дається до отриманого результату вимірювань. Поправки задаються у ви- гляді формул, таблиць або графіків.

Систематичні похибки розділяють на основні (інструментальні) і до- даткові (методу вимірювань, установки приладу, зчитування тощо).

Під інструментальною розуміється похибка застосовуваних засобів вимірювань, викликана недосконалістю їхнього виготовлення. Вона вини- кає через неякісне складання частин деталей, деформацій пружних елемен- тів, зношування тертьових частин при експлуатації й т.д. До цих похибок відносять і динамічні похибки, що виникають при вимірюваннях перемін- них величин. Інерційність засобу вимірювань не дозволяє точно визначити дану величину.

Похибки методу вимірювань пов'язані з помилковістю або недостатні- стю розробки теорії методу вимірювань або зі спрощеннями, допущеними при проведенні вимірювань.

Похибка установки приладу може бути викликана: неправильним ви- бором місця вимірювання; впливом несприятливих зовнішніх умов (вібра- ції, температури, вологості); далекістю об'єкта вимірювання від приладів обробки вимірювальних сигналів; недбалою установкою приладу (напри- клад, не по виску або рівню).

Похибки зчитування, що виникають при неавтоматизованих вимірю- ваннях, пояснюються індивідуальними особливостями спостерігача. Вони виникають при неправильному зчитуванні показань приладу (паралакс по- казань, їхня інтерполяція).

При технічних вимірюваннях ряд похибок (установки приладу, зчиту- вання (reading)) можна усунути, а інші визначити в результаті перевірки більш точними приборами. Похибки, які не можна усунути, нормуються й вказуються в паспорті засобу вимірювань.

* + 1. Випадкові похибки

Випадкові похибки є невизначеними за своєю величиною і приро- дою. В повторних вимірах вони не залишаються постійними, тому що ви- никають в результаті спільного впливу на процес виміру багатьох причин, кожна з яких проявляє себе по-різному і незалежно одна від одної.

Для одного виміру випадкові похибки не піддаються обліку однак для ряду повторних вимірювань однієї і тієї ж постійної величини, прове- дених з однаковою старанністю, їхній вплив на отриманий результат після виключення систематичних похибок і грубих помилок можна оцінити з де- якою імовірністю.

Теорія випадкових похибок, основана на методах теорії ймовірнос- тей і математичної статистики, дозволяє для проведення деякого числа по- вторних вимірювань уточнити кінцевий результат. В силу цього теорія ви- падкових похибок широко використовується для оцінки точності вимірю-

вань і надійності роботи вимірювальних приладів.

Велике число повторних вимірювань однієї і тієї ж постійної вели- чини показує, що поява однакових за розміром і різних за знаком випадко- вих похибок зберігає стійку частоту, яка підкоряється визначеній законо- мірності. Якщо позначити через n число проведених вимірювань, а через m число отриманих однакових випадкових похибок, то імовірність (частота) Р появи цих похибок знаходиться за формулою

Р = m/n . (1.7)

Для великого числа вимірювань імовірність появи різних випадкових похибок у більшості випадків підкоряється закону так званого нормально- го розподілу, що має вигляд

P(

2

 c

) 



1 2

e 2

, (1.8)

c  2

де P(c ) – імовірність появи випадкової похибки;

с – випадкова похибка виміру (с = х-X);

 – середнє квадратичне відхилення результату вимірювання; е – основа натуральних логарифмів.

На рис.1.1 показані криві 1 і 2 нормального розподілу випадкових похибок, побудовані за формулою (1.8) для двох значень середнього квад- ратичного відхилення , причому у кривої 1 це відхилення в два рази мен- ше, ніж у кривої 2. Криві розподілу симетричні що до осі ординат, тобто поява рівних за величиною, але протилежних за знаком випадкових похи- бок має однакову імовірність. В середній частині криві утворять опуклість, по обох сторонах від яких знаходяться точки перегину a і b, нижче яких криві стають увігнутими, асимптотично наближаючись до вісі абсцис. Найбільша імовірність для обох кривих відповідає випадковій погрішності

с=0. При зростанні похибки з будь-яким знаком імовірність її появи зме- ншується. Як видно з рис.1.1, криві розподілу 1 і 2 мають різні найбільші імовірності Р(с) і відстані між точками а і b перегину кривих. Проміжки між цими точками і віссю ординат рівні середньому квадратичному відхи- ленню  результату виміру, що характеризує ступінь розсіювання значень випадкових похибок. Чим нижче значення , тим менше розсіювання по- хибок, тому що при цьому майже вся площа під кривою розподілу розта- шовується поблизу осі ординат, що збільшує імовірність появи малих і зменшує появу великих похибок. Отже, зменшення  призводить до під- вищення точності вимірювань.

Р(с) Р(с)



17

*a b*

- +

(t)

З обробкою результатів ряду повторних вимірювань, що містять ви- падкові похибки, знаходиться середнє арифметичне значення *õ* , що є кін- цевим результатом вимірювань, тобто

х  х1  х2  ...  хn

n

xi

 i1

, (1.9)

n n

де: х1, х2, ... хn, - ряд виміряних значень, умовно позначених хі; n – число вимірювань.

Для оцінки випадкової погрішності зазвичай служить середньоквад- ратичне відхилення результату виміру  підраховане за формулою

n

2 2 2

(x

 x)2

(x  x)  (x  x)  ...  (x

* x) i

  1 2 n

 i1

. (1.10)

n 1 n 1

Основні характеристики кривої нормального розподілу випадкових похибок показані на рис.1.2. Ймовірність того, що випадкові похибки не вийдуть за межі (границі) якого-небудь інтервалу, визначається за площею, обмеженою кривою розподілу і цим інтервалом, відкладеним по осі абс- цис. Такий інтервал ± називається довірчим інтервалом, а відповідна йому імовірність появи випадкової погрішності (заштрихована площа) Ф(t) – до-

вірчою імовірністю.

Довірчий інтервал, що характеризує ступінь відтворюваності резуль- татів виміру, може мати різні значення, причому для великого довірчого інтервалу виходить і велика довірча імовірність. З вимірюванням може за- даватися або довірчий інтервал і за ним визначатися довірча імовірність, або, навпаки, за довірчою імовірністю підраховуватися довірчий інтервал. Таким чином, для характеристики значення випадкової погрішності необ- хідно мати дві величини - довірчий інтервал (confidence interval) і довірчу імовірність (confidence probability).

Довірчий інтервал  звичайно виражають через відносну величину t в частках середньоквадратичного відхилення 

t   . (1.11)



Для визначення довірчої імовірності Ф(t) чи величини t служить таблиця додатку В, складена на підставі закону нормального розподілу ви- падкових похибок.

Для попередньої оцінки ступеню вірогідності окремих вимірювань ряду крім середньоквадратичного відхилення  застосовуються також ймовірна похибка в і гранична (найбільша можлива) похибка пр.

Ймовірна похибка відповідає значенню t=0,675 і довірчій імовірності Ф(t)=0,5. Знаходиться вона за формулою

n

в  0,675 

2

(xi

і1

 x)2

. (1.12)

3 n 1

Зміст визначення цієї похибки полягає в тому, що для багаторазового вимірювання постійної величини 50% випадкових похибок буде менше ймовірної погрішності і 50% - більше.

Гранична похибка дорівнює довірчому інтервалу , тобто визнача- ється з рівності

пр =  = t . (1.13)

При користуванні додатком В варто пам'ятати, що він справедливий тільки для великого числа повторних вимірювань n. Однак, на практиці, часто число вимірювань буває обмеженим, що унеможливлює застосуван- ня закону нормального розподілу випадкових похибок.

Для малого числа повторних вимірювань n звичайно використову- ється розподіл випадкових похибок, запропонований Стюдентом. Для цього розподілу довірчий інтервал  чи довірча імовірність Р визначаються в залежності від величини n за додатком Г, причому величина t (яка нази-

вається дробом чи коефіцієнтом Стюдента) виражається співвідношенням

t    n



, (1.14)

де:  - середньоквадратичне відхилення, визначене за формулою (1.10).

* + 1. Динамічні похибки

Вимірювальні прилади використовуються для вимірювання ве- личин, що змінюються з часом, і є матеріальними системами, що мають різні інерційні властивості (механічні, теплові тощо). Інерційність прила- дів для змінного режиму роботи призводить до запізнювання їхніх показів, тобто до відставання показів від зміни вимірюваної величини.

Величина запізнювання показів залежить в основному від принципу дії і будови вимірювального приладу. На неї впливають: інерція рухливої частини приладу, теплоємність і теплопровідність термочутливого елемен- та і спосіб його установки, довжина і діаметр зєднувальних трубок тощо.

Залежність показів приладу від зміни вимірюваної величини в неста- лому режимі (перехідному процесі) називається динамічною характерис- тикою вимірювального приладу. Вид динамічної характеристики визнача- ється характером збурення вимірюваної величини і типом вимірювального приладу.

Динамічна характеристика приладів у більшості випадків знаходить- ся дослідним шляхом. Для одержання її проводиться значне стрибкоподі- бне збільшення вимірюваної величини до нового постійного значення і здійснюється безупинний запис показів приладу до моменту сталих пока- зів. На практиці поряд зі стрибкоподібною зміною вимірюваної величини остання може також змінюватися в часі за різними законами.

На рис.1.3 показана динамічна характеристика термометра. Тут по осі ор- динат відкладена температура речовини t, а по осі абсцис – час . При стрибкоподібній зміні вимірюваної температури від 0 до деякого постійно- го значення tі показання термометра tп (з виключеною з них систематичною похибкою) змінюються за кривою перехідного процесу, відстаючи в кожен момент часу від значення tі на значення динамічної похибки вимірювання д

д = tі – tп . (1.15)

*t, Δд*



*tп*

*tі*

0,95*tі* 0,63*tі*

*Δд*

0 н п Т

,Т

Таким чином, як ви- дно з рис.1.3, теплова іне- рція термометра, зумовле- на порівняно повільним нагріванням термочутли- вого елемента, призводить до запізнювання показів приладу на д, тобто при зміні вимірюваної темпе- ратури до нового сталого значення tі показання тер- мометра tп поступово до-

сягають цього значення.

Т

п

Отже, для оцінки

Рисунок 1.3 – Динамічна характеристика термометра

динамічних похибок приладу необхідно мати

криву його перехідного процесу, за якою для різних моментів часу можна знайти значення цих похибок.

Крім динамічних похибок динамічна характеристика вимірювально- го приладу містить ряд показників часу перехідного процесу (рис.1.3), до яких відносяться: час початку реагування н (час від початку зміни вимі- рюваної величини до початку зміни показів приладу); постійна часу п (час від початку реагування, протягом якого показання приладу досягнуть 63% зміни вимірюваної величини); час перехідного процесу Т (час, протягом якого показання приладу досягнуть 95% зміни вимірюваної величини); по- вний час установлення показань Тп (час, протягом якого показання прила- ду досягнуть 100% зміни вимірюваної величини).

Динамічна похибка д, постійна часу п і час перехідного процесу Т є основними величинами, що характеризують динамічні властивості вимі- рювальних приладів. Чим менші за інших рівних умов ці величини, тим меншие інерційне запізнювання має вимірювальний прилад і тим вищими є його динамічні якості.

* + 1. Грубі помилки

Вони пов'язані з факторами, котрі істотно спотворюють результат вимірювань, наприклад раптовим зниженням напруги електричного жив- лення приладу. Сюди ж відносяться так звані промахи - похибки, зв'язані з помилковими діями спостерігача (beholder), - неправильне визначення по- казань приладу, невірний їхній запис тощо. Результати вимірювань, що мі-

стять грубі помилки і промахи, відкидаються як явно неточні.

* 1. Повірка вимірювальних приладів

Для знаходження основної похибки в різних точках шкали приладу він через визначені терміни (чи в міру необхідності) повіряється, тобто йо- го показання порівнюють з показами точного приладу, що має в кілька ра- зів меншу похибку вимірювань, ніж прилад, що перевіряється.

Повірка (verification) приладів виконується як на спеціальних лабо- раторних стендах, так і на робочому місці. Порядок повірки різних прила- дів у лабораторії встановлюється відповідними державними стандартами та інструкціями, користування якими є обов'язковим. При повірці в лабо- раторії число точок шкали, що перевіряються, для промислових приладів складає звичайно 3-5, а для лабораторних і зразкових – не менше 10. Ре- зультати повірки заносяться до протоколу, на підставі якого у випадку придатності приладу виписується посвідчення. У цьому документі, крім паспортних даних приладу для всіх значень шкали, що перевіряються, приводяться дійсні значення і поправки. Крім того, у посвідченні вказу- ються дата перевірки і термін її дії.

Повірка промислових приладів на робочому місці здійснюється па- ралельним підключенням до них лабораторних (переносних) приладів. Цей вид перевірки є неповним, тому що в більшості випадків дозволяє порівня- ти показання приладу, що перевіряється, тільки в одній (робочій) точці.

За даними перевірки іноді будується графік поправок до показів при- ладу (рис.1.4), що полегшує визначення поправок у межах всієї шкали.

Перевірку приладів роблять спочатку для зростаючого значення вимірюва- ної величини (прямий хід), а потім для спадаючого (зворотній хід). Найбі- льша різниця показів, отримана в цьому випадку при тому самому значенні вимірюваної величини і незмінних зовнішніх умовах, називається варіаці- єю показів приладу. Поява варіації звичайно викликається пружною чи те- рмічною післядією чутливого елемента, тертям рухливих частин, наявніс- тю зазорів (люфтів) у механізмах тощо.

Варіація показів приладу v’ у відсотках діапазону показів знаходить- ся за формулою:

v 

v

Nk  Nн

100 , (1.16)

де Nk i Nн - початкове і кінцеве значення шкали.

Термометр № 103256; повірка 23.12.20012р.

2



|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

1

Поправка, С

0

1

2

0 50 100 150 200 250

Показання термометра, С

Рисунок 1.4 – Графік поправок термометра

Характерними величинами є також непостійність показів і поріг чут- ливості приладу.

Непостійність показів є різницею між найбільшим і найменшим по- казами приладу, що відповідають тому самому значенню величини, що вимірюється при багаторазових повірках в однакових умовах.

Поріг чутливості визначає мінімальну зміну значення величини, яка вимірюється, що викликає найменшу зміну показів приладу. Поріг чутли- вості залежить головним чином від наявності тертя у вимірювальному пристрої приладу.

* 1. Метрологічні характеристики засобів вимірювань

У номенклатуру (range) метрологічних характеристик входять:

* + 1. характеристики засобів вимірювань, що визначають результати вимі- рювань;
    2. характеристики основної (систематичної) похибки засобів вимірювань;
    3. характеристики чутливості засобів вимірювань до впливаючих (influ- encing) величин;
    4. динамічні характеристики засобів вимірювань;
    5. характеристики засобів вимірювань, що визначають додаткову похиб- ку через взаємодію із зовнішнім об'єктом.

# 2 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

* 1. Температура як характеристика термодинамічного стану

З точки зору термодинаміки температура – міра середньої кінетичної енергії хаотичного теплового руху молекул. Температура характеризує ступінь нагрітості (heated) тіла і є одним з найважливіших параметрів теп- лотехнологічних процесів. При цьому об'єкт із більшою температурою пе- редає теплову енергію об'єкту з меншою температурою так, що відбуваєть- ся їхнє вирівнювання.

Виміряти температуру якого-небудь тіла безпосередньо, так як вимі- рюють інші фізичні величини, такі як масу, обєм або час неможливо, бо в природі немає зразка або еталона одиниці цієї величини. Тому визначення температури проводять шляхом спостерігання за зміною фізичних власти- востей іншої (термометричної) речовини, котре в контакті з нагрітим тілом через деякий час вступає з ним в теплову рівновагу. Такий метод вимірю- вання дає не абсолютне значення температури середовища а лише різницю відносно початкової температури робочого середовища, умовно прийнятої за нуль. Отже, безпосередньо температуру визначити не можна, можна оцінити її значення за якимись іншими параметрами тіла, які змінюються однозначно від зміни температури. Такими параметрами є: обєм, довжина, електричний опір, термоелектрорушійна сила, енергетична яскравість ви- промінювання тощо.

Прилади для вимірювання температури з'явилися ще в XVII в. Були запропоновані різні температурні шкали: Фаренгейта, Реомюра, Цельсія й ін. В основі побудови цих шкал лежить вибір двох опорних (реперних) те- мператур, що характеризують фазову рівновагу чистої речовини при його переході з одного агрегатного стану в інший. Інтервал між опорними тем- пературами ділиться на певне число позначок з однаковою довжиною по- ділу, які й утворять температурну шкалу. Ціну ділення такої шкали нази- вають градусом. Зокрема, для стоградусної шкали Цельсія як реперні тем- ператури прийняті температури плавлення льоду й кипіння води за норма- льного атмосферного тиску.

Зміна термометричних властивостей в інтервалі між реперними точ- ками апроксимувалось лінійною залежністю від температури

Т = Т0 + кС , (2.1)

де: Т0 – значення температури в одній з реперних точок;

С – значення термометричної властивості для температури Т;

к – коефіцієнт пропорційності, який визначається за значеннями термомет- ричних властивостей і температур в реперних точках.

В процесі досліджень вияснилось, що температурні шкали (tempera- ture scale), побудовані на одних і тих же реперних точках (fixed point), але з використанням різних термометричних речовин давали різні значення те- мператури. Це пояснюється тим, що термоелектричні властивості речовин по різному змінюються з температурою, причому всі ці залежності нелі- нійні. Виникла проблема створення температурної шкали, яка б не залежа- ла від термометричних властивостей речовин. Користуючись другим зако- ном термодинаміки таку шкалу запропонував лорд Кельвін в 1848 році. Вона отримала назву термодинамічної температурної шкали (шкали Кель- віна) і базується на рівнянні термодинаміки для оборотного циклу Карно: Q1/Q2 = T1/T2. Це рівняння показує, що для роботи теплового двигуна за оборотним циклом відношення кількості тепла Q1, отриманого робочим ті- лом від нагрівника до кількості тепла Q2, відданого ним холодильнику, пропорційно відношенню температур T1/T2 нагрівника і холодильника. Однак, практично вказаний метод вимірювання температури використаний бути не може, оскільки оборотний цикл Карно на практиці реалізувати не- можливо.

Термодинамічна температурна шкала стала вихідною при побудові температурних шкал, що не залежать від властивостей термометричної ре- човини. Її одиницею слугує градус Кельвіна (К) - 1/273,16 частина термо- динамічної температури рівноваги між твердою, рідкою й газоподібною фазами води (потрійна точка води).

* 1. Міжнародна температурна шкала

Однак для практичного виміру температури термодинамічна шкала незручна, оскільки необхідно використовувати громіздкі газові термометри із введенням для кожного значення температури різних поправок. В пода- льшому, за допомогою газових термометрів була побудована Міжнародна практична температурна шкала (МПТШ), котра легко і точно відтворюєть- ся і близька до термодинамічної шкали. Ця шкала створена на основі ста- нів фазової рівноваги ряду чистих речовин (водню, неону, кисню, води, цинку, срібла, золота). Цим станам речовин (їх обрано одинадцять) відпо- відає постійне значення температури по термодинамічній шкалі. МПТШ прийнята на VII Генеральній конференції по мірах і вагах в 1927р., уточ- нена в 1948, 1960, а її нова редакція прийнята в 1968 році на ХІІІ Генера- льній конференції по мірах і вагах (МПТШ-68). ЇЇ градуси позначаються знаком С (градус Цельсія), а умовне позначення температури буквою t. Для цієї шкали градус Цельсія рівний Кельвіну.

МПТШ-68 була основана на значеннях температур ряду відтворюва- них станів рівноваги між фазами чистих речовин. Але практична термоме- трія не стоїть на місці. Дані про методи інтерполяції постійно удоскона- люються і в шкалу вносяться поправки. Так, МПТШ-68 поступово транс- формувалась в МТШ-90 – міжнародну температурну шкалу.

Шкала МТШ-90 є найбільш близькою на даний момент можливою апроксимацією термодинамічної температурної шкали. Точність апрокси- мації, в основному, визначається точністю вимірювання термодинамічних температур реперних точок - фазових переходів чистих речовин. Якщо в період утвердження першої шкали найбільш точні експерименти в діапа- зоні середніх температур проводилися за допомогою газових термометрів, то в даний час отримують розвиток інші прогресивні методи вимірювання температури.

У 2002 р. в Чікаго в рамках міжнародної конференції «Temperature, Its Measurement and Control in Science and Indusry» був проведений спеціа- льний семінар "Towards the ITS-XX" (До нової шкали МТШ-ХХ). Літери ХХ означають можливу дату прийняття шкали.

В останнє десятиліття основними напрямками, в яких ведуться нау- кові дослідження і дискусії щодо вдосконалення МТШ є наступні:

* розвиток термодинамічних методів визначення температур реперних то- чок (акустична термометрія, шумова термометрія, абсолютні радіометрич- ні вимірювання);
* розширення набору реперних точок у високотемпературній області за ра- хунок введення в шкалу точок фазових переходів евтектичних сплавів (eu- tectic alloys) метал-вуглець.

Основні напрямки запланованих досліджень такі:

* встановити мінімальні вимоги до чистоти матеріалів реперних точок і ви- значити надійних постачальників матеріалів;
* дослідити процес створення комірок реперних точок, які можуть гаранту- вати відтворюваність температури на рівні ± 500 мК і виробити рекомен- дації по технології створення комірок;
* провести дослідження довготривалої стабільності реперних точок;
* виробити технічні рекомендації з підвищення надійності комірок (nucleus);
* виробити технічні рекомендації до конструкції печей;
* кількісно визначити вплив печі на випромінювальну здатність системи піч-порожнина комірки;
* побудувати бюджет невизначеності для температур реперних точок, що включає вплив термометрів, печі, комірки;
* провести двоступеневі міжнародні звірення обраного набору реперних евтектичних точок, перша ступінь повинна включати дослідження поточ- них проблем радіометрії та можливості їх вирішення, друга ступінь - прив- ласнення точкам значень термодинамічних температур.

Значення температур між постійними температурами станів рівноваги визначають за інтерполяційними формулами за допомогою еталонних за- собів вимірювань. Як такі засоби вимірювань для температур від 13,81 до 903,89 К (630,74 °С) використовують термометр опору із платинового дро- ту, для температур від 903,89 до 1337,52 К (1064,3 °С) – платинородій- платиновий термоелектричний термометр, від 1337,58 до 6300 К – монох- роматичний пірометр випромінювання.

Засіб вимірювання температури, призначений для вироблення сигналу у формі, зручної для сприйняття спостерігачем, автоматичної обробки, пе- редачі й використання в автоматичних системах керування, називається термометром.

* 1. Класифікація приладів для вимірювання температури

Прилади для вимірювання температури діляться в залежності від ви- користаних в них фізичних властивостей речовин на групи, показані в таб- лиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Прилади для вимірювання температури

Тип засобу вимірювання

Термометри розширення

Термометри опору

Термоелектричні термомет- ри

Різновид засобу вимірювання

Термоелектричні термомет- ри

Межа довготривалого використання, С

-200 2200

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | нижня | верхня |
| Рідинні скляні термометри | -200 | 600 |
| Манометричні термометри | -200 | 1000 |
| На основі металів | -260 | 1100 |
| На основі напівпровідників | -272 | 600 |

Пірометри

Квазімонохроматичні 700 6000

Термометри розширення побудовані на властивості тіл змінювати під дією температури свій об'єм або довжину, термоелектричні термометри

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | (100 000) |
| Спектрального відношення | 300 | 2800 |
| Повного випромінювання | -50 | 3500 |

* на властивості різнорідних металів і сплавів утворювати в термо-е.р.с., що залежить від температури спаю (ефект Зеебека), манометричні термо-

метри працюють на принципі зміни тиску рідини, газу або пари з рідиною в замкненому обємі з нагріванням або охолодженням цих речовин, а тер- мометри опору – на властивості тіл змінювати залежно від нагрівання еле- ктричний опір.

Особливе місце займають засоби вимірювань температури за тепло- вим електромагнітним випромінюванням, названі пірометрами. Пірометри служать для безконтактного виміру температури.

* 1. Рідинні термометри розширення

Фізична властивість речовин змінювати свої розміри залежно від те- мператури широко використовується для її вимірювання. На цьому прин- ципі ґрунтується робота рідинних скляних і дилатометричних термомет- рів.

Рідинні скляні термометри є показуючими приладами, розта- шовуваними в місці вимірювання. Принцип їхньої дії базується на тепло- вому розширенні рідини в скляному резервуарі залежно від вимірюваної температури. Як робочі речовини використовуються ртуть і органічні ре- човини - толуол, етиловий спирт, гас тощо (табл.2.2).

Таблиця 2.2 – Характеристики термометричних рідин

Рідина Середня температура Межі використання Середній ТКОР,

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 105К-1 | | | | | | |
|  | тверднення | кипіння | нижній | верхній | дійсний | видимий |
| Ртуть | -38,9 | 356,6 | -35 | 600 | 18 | 16 |
| Толуол | -97,2 | 109,8 | -90 | 200 | 109 | 107 |
| Етиловий спирт | -114,5 | 78,0 | -80 | 70 | 105 | 103 |
| Гас | - | до 325 | -60 | 200 | 95 | 93 |
| Петролейний | - | до 70 | -120 | 25 | 152 | 150 |

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ефір |  | | | | | |
| Пентан | -200 | 36 | -200 | 20 | 92 | 90 |

Рідинні термометри за конструкцією (рис.2.1) бувають: з вкладеною шкалою (а), паличкові (stick) (б), з розривним стовпчиком (в).

Скляний рідинний термометр складається з резервуара 4 з робочою рідиною й припаяного, закритого із протилежного кінця скляного капіляра

5. Уздовж капіляра розташована шкала 3, на якій нанесені цифрові познач- ки температури в градусах Цельсія. За верхньою оцінкою шкали є запас- ний об'єм капіляра 1, заповнений інертним газом під тиском, Цей об'єм охороняє прилад від ушкоджень при перегріві. Всі зазначені деталі термо- метра розміщені в скляній захисній оболонці 2. Паличкові термометри ви- готовлені з каліброваних товстостінних скляних або кварцових трубок, на

поверхню яких нанесена шкала механічним способом при градуюванні. Термометри з розривним стовпчиком після резервуара мають розширення капіляра 6. Термометрична рідина при охолодженні розривається і зали- шок рідини в капілярі показує зафіксовану температуру. Такі термометри повертають в робоче положення струшуванням.

2 2



1

3

5

4

1

3

5

4



1

2

3

5

6

4

а) б) в)

Рисунок 2.1 – Конструкції скляних рідинних термометрів

Температуру вимірюваного середовища, яка міститься у резервуарі і частині капіляра скляного термометра, визначають за зміною об'єму тер- мометричної рідини, який відлічується по положенню рівня рідини в капі- лярі. Зміна в капілярі рівня рідини при нагріванні резервуара (від темпера- тури t1 до t2

Δ h=1,27[V1(αр- αс)(t2-t1)]/d2 , (2.2)

де V1, – об'єм рідини при температурі t1;

αр і αс – середні коефіцієнти температурного розширення рідини й скла; d – внутрішній діаметр капіляра.

Чим більший резервуар (container) і менший внутрішній переріз капі- ляра, тим більш помітна зміна висоти стовпчика рідини, тобто тим більше чутливий термометр і меншою є ціна поділки шкали. Оскільки в термоме- трі одночасно з розширенням рідини відбувається розширення скляних ре- зервуара й капіляра, різниця αрр-αс називається коефіцієнтом видимого ро- зширення рідини в склі.

З рідинних термометрів найпоширенішими є ртутні, що мають ряд

переваг: ртуть не змочує скло (стінки капіляра), у широкому діапазоні тем- ператур залишається рідкою і має стабільний коефіцієнт розширення. Це приводить до того, що ртутні термометри мають майже рівномірну шкалу і забезпечують високу точність вимірювання температури. Нижня межа ви- мірювання (–35 °С) визначається температурою затвердіння ртуті, а верхня (650 °С) – температурою початку розм'якшення скла. Недоліком ртутних термометрів є порівняно невеликий коефіцієнт розширення.

Скляні термометри з органічними рідинами застосовують за більш низьких температур від –200 до +200 °С. Недоліками таких рідин є змочу- вання скла й несталість коефіцієнта розширення. Залежно від методу гра- дуювання розрізняють дві групи термометрів: градуйовані при повному й неповному зануренні із заданою температурою їхньої виступаючої частини (зазвичай 20 °С).

Термометри першої групи мають більше високу точність вимірю- вання й використовуються в лабораторних умовах, термометри другої гру- пи (технічні) – для виміру температур у промисловості (глибина їхнього занурення в міліметрах зазначена на звороті шкали). Технічні термометри за формою нижньої частини з резервуаром бувають прямими типу А и ку- товими типу Б (нижня частина вигнута під кутом 90° відносно шкальної частини).

Межі основної похибки скляних термометрів вказуються в їхньому паспорті й залежать від діапазону вимірювань, ціни ділення шкали й виду термометричної рідини. Якщо при вимірюваннях температура виступаючої частини технічного термометра відрізняється від температури його граду- ювання, виникає додаткова похибка за рахунок виступаючого стовпчика рідини. Її усувають поправкою до показань термометра. Цю похибку необ- хідно враховувати для термометрів з органічними рідинами.

Іншою додатковою похибкою, характерною для скляних термомет- рів, є зсув їхньої нульової точки вбік негативних градусів. Це пояснюється тим, що скло після нагрівання при вимірюванні в нормальних умовах не відразу приймає свій первісний об'єм, причому чим вище вимірювана тем- пература, тим зсув більше. Наприклад, у технічних термометрів зі шкалою 0–600 °С зсув досягає 3 °С.

Точність показань технічних термометрів залежить від способу й мі- сця їхньої установки. Застосовують два способи установки ртутних термо- метрів: у захисних оправах (гільзах) і без них прямим зануренням термо- метрів у вимірюване середовище. Перший спосіб використовують для ви- мірювання температури середовища, що перебуває під надлишковим тис- ком, при цьому довжина захисної гільзи залежить від необхідної глибини

занурення.

При установці ртутного термометра без гільзи зменшується відвід теплоти від резервуара, підвищується швидкодія приладу, але зростає вплив тиску вимірюваного середовища на показання термометра (стиск ре- зервуара з видавлюванням ртуті в капіляр). Тому такий спосіб використо- вують для середовищ із невеликими тисками й звичайно при короткочас- них точних вимірюваннях їхньої температури. Для регулювання темпера- тури й сигналізації в лабораторних і промислових умовах застосовують електроконтактні ртутні термометри в інтервалі від -30 до +300 °С. Їх ви- пускають із постійними робочими контактами, упаяними в капіляр. Скляні рідинні термометри є одним з найбільш точних засобів вимірювань темпе- ратури, але мають вузький діапазон використання.

Отже, підсумуємо поправки до рідинних термометрів

* основна, яка приймається з свідоцтва на термометр;
* на температуру виступаючого стовпчика ртуті, яка водиться тільки до показів лабораторних та зразкових термометрів в тих випадках, коли при вимірювання частина ртутного стовпчика значно виступає із захисної гільзи, а температура навколишнього середовища значно відрізняється від температури виміру. Тоді стовпчик має температу- ру, яка не дорівнює температурі вимірюваного середовища, а ТКОР (температурний коефіцієнт об’ємного розширення) стовпчика знахо- диться між значеннями ТКОР при температурах вимірюваного сере- довища і навколишнього середовища. Поправка: tв=nв(tт – tв); де n

– число градусів у виступаючій частині ртутного стовпчика; в – те- мпературний коефіцієнт видимого розширення ртуті в склі К-1 ; tт – показання термометра; tв – середня температура виступаючого стов- пчика ртуті;

* на зміщення положення нульової точки, періодично перевіряється в процесі експлуатації за допомогою термостату плавлення льоду.
  1. Дилатометричні (dilatometric) й біметалічні термометри

Тверді речовини, як і рідини, залежно від температури змінюють свої геометричні розміри. Так, залежність довжини твердого толу від його температури

L=L0[1+α(t-t0)], (2.3)

де L0 – початкова довжина речовини при фіксованій температурі t0; α – коефіцієнт температурного розширення;

*t* – поточна температура речовини.

До дилатометричних термометрів відносяться стержневий і пластин- частий (біметалічний) термометри, дія яких основана на різниці відносного видовження двох різних тіл, що мають різні температурні коефіцієнти лі- нійного розширення під дією температури. Через нестабільність коефіціє- нта α дилатометричні термометри не одержали широкого розповсюджен- ня. Їх застосовують як чутливі елементи сигналізаторів температури, а іноді для компенсації впливу температури навколишнього середовища на показання приладів, у які їх вбудовують.

Значення середніх температурних коефіцієнтів лінійного розширення для деяких матеріалів, в інтервалі температур 0-200С вказані в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Середні температурні коефіцієнти лінійного розширення

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Матеріал | 106, К-1 | Матеріал | 106, К-1 |
| Алюміній | 24 | Латунь | 18,5 |
| Залізо | 12,5 | Нікель | 14 |
| Інвар (64%Fe, 36%Ni) | 3,5 | Сталь немагнітна (Х18Н10Т) | 17 |
| Кварц плавлений | 0,55 | Фарфор | 3,5 |

Біметалічні термометри реалізуються у вигляді двох металевих стрі- чок, з’єднаних між собою, які мають різні коефіцієнти теплового розши- рення. При зміні температури система вигинається (bending) і по вигину визначається температура.

* 1. Манометричні термометри

Принцип дії манометричних термометрів ґрунтується на залежності тиску робочої речовини (рідини, газу або пари з рідиною), що займає за- мкнутий об'єм (термосистему), від температури. По виду робочої речовини ці термометри розділяють на газові, конденсаційні й рідинні. Робочу речо- вину вибирають виходячи із заданого діапазону вимірювань і умов роботи. Відомо, що при підвищенні температури тиск збільшується, а при зниженні зменшується. Зміна тиску робочої речовини передається через капіляр пружині манометра (рис.2.2), що частково випрямлюється, викли-

каючи переміщення стрілки по шкалі приладу.

Манометричні термометри мають ряд похибок вимірювання. Крім основної, що викликається недосконалістю роботи пружини і передаточно- го механізму ці прилади мають також додаткові похибки: барометричну, звязану зі зміною барометричного тиску в процесі вимірювань, темпера- турну (в газових і рідинних), що виникає при коливаннях температури на- вколишнього повітря, гідростатичну (в рідинних і конденсаційних), яка

зявляється з установкою термобалона і пружини на різних висотах, один відносно іншої.

Газові манометричні термометри, заповнювані азотом, випускаються для виміру температур від –200 до +600 °С, класом точності 1 і 1,5 і мають рівномірну шкалу. Залежність зміни тиску газу при постійному обємі про- порційне зміні температури: Р2 – Р1 = Р1(t2 – t1). Тут Р1 і Р2 початковий і кінцевий тиск робочої речовини МПа,  - температурний коефіцієнт тиску, К-1. Для газів коефіцієнт тиску рівний коефіцієнту обємного розширення

, який має практично постійне значення, рівне 3,6610-3 К-1. Таким чином, для газів

Р2 – Р1 = Р1(t2 – t1). (2.4)

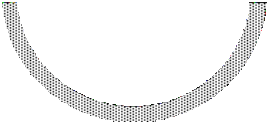
Барометрична похибка газового термометра зменшується з підви- щенням в системі початкового тиску, тому заповнення термобалона азотом проводять під тиском 3,5 МПа.

На показання газових манометрів може впливати температура на- вколишнього середовища. Відмінність цієї температури від її значення, прийнятого при градуюванні приладу (t =20 °С), викликає зміну тиску газу в термометрі, що позначається на його показаннях.

Конденсаційні манометричні термометри випускаються для виміру температур від –50 до +300 °С класом точності 1,5; 2,5 і мають нерівномірну шкалу. Термобалон заповнюють низькокиплячою рідиною (фреоном, про- піленом, ацетоном, етилбензином), що перебуває в рівновазі з насиченою парою. Капіляр і пружину зазвичай заповнюють іншою рідиною (напри- клад, метаксилолом). При цьому температура рідини нелінійно залежить від тиску насиченої пари. Дія цих приладів основана на законі Дальтона, який дає однозначну залежність між тиском і температурою насиченої па- ри аж до критичної температури речовини. Перевагами цих термометрів є незалежність показань від температури навколишнього середовища, біль- ша швидкодія, чим у газових термометрів, слабкий вплив коливань атмос- ферного тиску на показання, а їхніми недоліками - нерівномірність шкали, особливо початкової ділянки, залежність показань від розташування тер- мобалона й корпуса приладу. Якщо термобалон розташований вище корпу- са, показання приладу будуть завищені, якщо нижче – занижені. Внаслідок цієї похибки довжина капіляра не перевищує 25 м.

Рідинні манометричні термометри випускають для виміру темпера- тур від 150 до 300 °С, класом точності 1; 1,5 і мають рівномірну шкалу. Їх заповнюють силіконовими рідинами, метаксилоном, пропіловим спиртом.

5



2

1

6

3

4

Рисунок 2.2 – Схема манометричного термометра 1 – термобалон – металічна трубка з робочим тілом;

1. – покажчик;
2. – шкала;
3. – одновиткова пружина; 5 – вісь;

6 – манометричний капіляр.

Рідинні термометри відрізняються від газових і конденсаційних тим, що їхня робоча речовина нестислива, завдяки чому забезпечується найбі- льша серед манометричних термометрів швидкодія. Зміни атмосферного тиску на показання манометра впливу не роблять. Недоліки рідинних тер- мометрів - залежність їхніх показань від температури навколишнього се- редовища, а також суттєва гідростатична похибка через різні рівні розта- шування термобалона й вимірювального приладу. Для усунення першого недоліку застосовують ті ж способи, що й у газових термометрах, а для усунення другого обмежують довжину капіляра до 10 м.

* 1. Термоелектричні термометри

Термопари є активним електричним датчиком температури, придат- ним для точного вимірювання температур не лише в газових або рідинних середовищах, а й на твердих поверхнях. Завдяки своїй простоті, надійності, стабільності, простоті автоматизації і можливості дистанційного контролю вимірюваної температури вони надзвичайно широко використовуються для контролю і вимірювання температур в лабораторній практиці і в про- мисловості.

Принцип дії термоелектричних термометрів заснований на властиво- сті металів та їх сплавів створювати термо-е.р.с. (thermoelectric power) в

місці спаю двох різнорідних провідників, яка пропорційна температурі на гарячому і холодному кінцях спаю. Ця термо-е.р.с. визначається, як:

Е = (tгар – tхол), (2.5)

де:  - диференційний коефіцієнт термо-е.р.с пари, мкВ/К;

tгар і tхол температури гарячого і холодного спаїв термопари відповідно.

Термометри складаються із двох різнорідних провідників, спаяні кі- нці яких називають гарячими або робочими, а вільні -холодними.

Знаючи закон зміни термо-е.р.с. термометра залежно від температу- ри, за допомогою електровимірювального (electrical measuring) приладу можна визначити шукану температуру. При цьому термоелектричний тер- мометр є первинним вимірювальним перетворювачем, а як вторинний прилад використовують мілівольтметри й потенціометри.

Розглянемо замкнутий коло із двох різнорідних провідників А і В (рис. 2.3).

t1

A В

2

1

t

Рисунок 2.3 – Коло термоелектричного термометра

У спаях (точки 1 і 2) виникають дві термо-е.р.с. Спай 1, що занурю- ється у вимірюване середовище, називають робочим кінцем, а спай 2 - ві- льним кінцем термоелектричного термометра. При цьому температура в проміжних точках дротів не впливає на величину термо-е.р.с., якщо дроти мають однорідну структуру. Основним правилом роботи з термопарами є те, що якщо в коло термопари включено ще один провідник, кінці якого мають однакові температури то він не впливає на величину термо-е.р.с. Це дає змогу включати в коло прилад, для вимірювання термо-е.р.с, розташо- вуючи його на суттєвій відстані від гарячого спаю термопари. Для провід- ників термопар використовують дріт діаметром від 0,1 до 2 мм.

Залежно від значення виникаючої термо-е.р.с. й загального електрично- го опору в контурі провідників виникає електричний струм, який можна вимі- ряти. Для вимірювання струму, а отже, і термо-е.р.с. термометра в його коло за допомогою дротів включають вимірювальний прилад ВП двома способами: розривають коло у спаї 2 або один із провідників термометра (рис. 2.4).

t0

С

С

ВП

2

3

А

1

B

t0 t0

2

B t1 3

ВП

4

С

1

Б

t1

С

t а)

t б)

Рисунок 2.4 – Схеми включення вимірювального приладу в коло термоелектричного термометра

а) - у місце спаю, б) - в один із провідників

Перший спосіб приєднання вимірювального приладу одержав більше поширення.

Міжнародною електротехнічною комісією рекомендовано градуюва- льні таблиці (табл. 2.4) для шести типів термопар (в дужках позначення, що рекомендовані Національним інститутом стандартів США).

Таблиця 2.4 – Термоелектричні термометри стандартних градуювань

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Позначення типів термо-  електричних термометрів | Найменування матеріалів термоелектродів | Позначен ня градуюва ння | Діапазон вимірювань при тривалому застосуванні | Межа вимірювань, що допускається, при короткочасному  застосуванні |
|  | Платинородій (10% |  |  |  |
| ТПП (S, R) | родію)– Платина,  Платинородій (13% | ПП10/0  ПП13/0 | 0–1300 | 1600 |
|  | родію)– Платина, |  |  |  |
| ТПР (B) | Платинородій (30%  родію) – Платинородій | ПР30/6 | 300–1600 | 1800 |
| ТВР (C, G) | Вольфрамреній (5%  ренію) – Вольфрамрений | ВР5/20 | 0–2200 | 2500 |
| ТХА (K) | Хромель – Алюмель | ХА | -200–1000 | 1300 |
| ТХК (E) | Хромель – Копель | ХК | -200–600 | 800 |
| ТМК (Т) | Мідь – Константан | МК | -260–400 | 500 |
| ТЖК (J) | Залізо – Константан | ЖК | -200-750 | 750 |

Вимірювання температури термоелектричним термометром допуска- ється тоді, коли точно відома температура t0 його вільного кінця. Залеж- ність термо-е.р.с. E(t) термометра від температури робочого кінця при те-

мпературі його вільних кінців t0 = 0С визначається експериментально й називається градуювальною характеристикою термометра. На підставі цієї залежності складають градуювальні таблиці й графіки для визначення тем- ператури за термо-е.р.с. термопари.

Мідь-константан [МКн], (Т)

Константан - сплав міді з нікелем, складу Cu57Ni43, марка МНМц 43- 0,5. Термопара мідь-константан (МКн) недорога, точна і дозволяє надійно вимірювати температуру від –260 до +400С, причому верхня границя об- межується можливістю окислення міді.

Залізо-константан [ЖКн], (J)

Термопара залізо-константан широко використовується до 750С. Вона дозволяє вимірювати вдвічі більшу температуру ніж термопара МКн. Її перевага також в можливості використання як в окислювальних, так і в відновлювальних середовищах, причому в останньому випадку робочі те- мператури можуть бути більшими. Однак, оскільки Fe менш однорідний ніж Cu, в цій термопарі спостерігаються паразитні термо-е.р.с. вздовж обох віток, а її точність приблизно вдвоє нижча (як і ціна) в порівнянні з термопарою мідь-константан.

Хромель-константан [ХК], (Е)

Хромель – сплав складу Nі90Сr10 (HX9,5), який деколи позначають як хромель-Р. Термопара ХК має найвищу термо-е.р.с з шести стандартизова- них термопар. Вона може використовуватись приблизно від –250 до 750С, в тому числі і в слабоокислювальній (poor oxidizing) або в відновлювальній (renewable) атмосфері. Висока термо-е.р.с. робить цю термопару придат- ною для диференційного вимірювання температури.

Хромель-алюмель [ХА], (К)

Алюмель досить складний нікелевий сплав складу Ni94Mn3Al2Si, (НМцАК 2-2-1), розроблений в якості термопарного матеріалу з термо- е.р.с. протилежного знаку по відношенню до хромелю. Пара хромель- алюмель має постійну термо-е.р.с. 40 мкВ/К в інтервалі температур 250- 1000ºС. Термопара ХА може короткий час працювати до 1300ºС, вона більш окисостійка ніж інші термопари і може використовуватися до тем- ператур 1200ºС без швидкого окислення. У відновлювальній атмосфері термопару ХА використовувати не можна. Для низьких температур її хара- ктеристики приблизно такі ж як мідь-константан, хоча для вимірювань температур нижче кімнатної рекомендується інший склад хромелю: Ni64Fe25Cr11 (хромель – Х).

Вольфрам-вольфрамреній [ВР5/20 і ВР10/20], (С і G).

Ці термопари, що складаються з тугоплавких металів, можна викорис-

товувати до температур 2700-3000ºС. Потрібно пам’ятати, що термопари типу ВР нестабільні в окислювальному середовищі і повинні використову- ватися в вакуумі або в атмосфері водню чи інертного газу. Не дивлячись на відносну крихкість чистого вольфраму, за кордоном широко використову- ються термопари (W-W+Re26 -типу G).

Платина-платинородій (R, S, B).

Це базисні термопари , які відіграють велику роль в термометрії внаслі- док прекрасних механічних і хімічних властивостей і високого ступеня го- могенності. Термопари мають такий склад: ПР 10/0 - (Pt- Pt90+ Rh10 тип S), ПР 13/0- (Pt- Pt87 Rh13, тип R), ПР 30/6 (Pt70+ Rh30 – Pt94+ Rh6, тип В). Тер-

мопари S, R і B, які постачаються, мають або високоякісну калібрувальну, або нормальну стандартну шкалу. Їх можна тривалий час використовувати на повітрі та в інертній атмосфері. У вакуумі термопари цих типів використову- вати не можна.

Для вимірювання температур термопарами один із спаїв термоста- тують при 0С. Таблиці саме і складені для випадку, коли холодний спай має 0С. Якщо з якихось причин спай не вдається термостатувати при 0С, то в цьому випадку, знаючи, що термо-е.р.с. пропорційна Т1-Т2 для визна- чення температури необхідно внести поправку на температуру холодного спаю. Для цього іншим термометром (наприклад ртутним) вимірюють те- мпературу навколишнього середовища, в якому знаходяться холодні спаї термопари і віднімають від різниці Т1-Т2. За визначеним Т з таблиць чи графіків визначають температуру. Клас точності ртутного термометра, яким вимірюють температуру навколишнього середовища для врахування по- правки на холодний спай не повинен бути нижчим за клас точності термопари. На практиці температура вільних кінців термометра, хоча й підтри- мується постійної, але не дорівнює 0 С, тому термо-е.р.с. теж змінюється й

доводиться вносити поправки в показання приладу.

Для введення поправки необхідно до отриманої термо-е.р.с. термо- метра E(t) додати термо-е.р.с. E(t0), взяту з градуювальних таблиць даних термоелектродів. За отриманою сумою за допомогою градуювальних таб- лиць визначають шукану температуру.

* 1. Компенсаційні дроти

Вільні (холодні) спаї термопар повинні знаходитись з температурою 0С, або їх температура повинна бути постійною, щоб можна було ввести поправку на холодний спай. Якщо вільні кінці розташувати в головці тер- моелектричного термометра, там де закінчуються термоелектрони термо-

метра, то сталу температуру вільних спаїв забезпечити буде неможливо внаслідок невеликої відстані до вимірюваного середовища, нерівномірного температурного поля і високого температурного градієнту в точці знахо- дження вільних спаїв. В звязку з цим виникає необхідність подовжити термоелектричний термометр, не спотворюючи його термо-е.р.с., щоб від- вести вільні кінці в таке місце, де буде зручно їх термостатувати, або вста- новити пристрій для автоматичного введення поправки. Це робиться за до- помогою компенсаційних дротів. Для виключення паразитних термо-е.р.с. компенсаційні (подовжувальні) дроти повинні мати ту ж саму градуюваль- ну характеристику, що й сам термометр. В таблиці 2.5 вказані рекомендо- вані типи компенсаційних дротів для різних видів термопар.

Таблиця 2.5 Рекомендовані подовжуючі компенсаційні дроти

Подовжувальні термопарні дроти

Термопара

Позна чення

Пара жил Фарбування Термо-

е.р.с.

Мідь-копель МК мідь-ТП червона- зелена

4,79

Хромель-копель ХК хромель- копель

Хромель-алюмель ХА мідь- константан

фіолетово- жовта фіолетово- жовта

6,9

4,1

Платинородій платина П мідь-ТП червоно-

зелена

0,64

Вольфрамреній-вольфрамреній М-МН мідь-МН2,4 червоно-синя 1,4

Кожен матеріал дроту має свій колір ізоляції або свої кольорові нит- ки в обмотці дротів.

* 1. Методи вимірювання термо-е.р.с.

Вимірювання мілівольтметром. Коли термо-е.р.с. термометра вимі- рюється мілівольтметром, необхідно мати на увазі, що фактично міліволь- тметр вимірює не термо-е.р.с., а струм, що протікає по рамці приладу. То- му для однозначної залежності між термо-е.р.с. і показами мілівольтметра необхідно, щоб опір всього кола був сталим. Якщо врахувати ще й вимогу правильності показів, то необхідно, щоб опір всього кола був рівний тому значенню опору кола, який був при градуюванні вольтметра. На рис. 2.5 представлена типова схема підключення термопари до мілівольтметра. Для підгонки опору зовнішнього кола до градуювального значення використо- вується під гоночна котушка Rп. Щоб зменшити вплив зміни опору зовні-

шнього кола на показання мілівольтметра, необхідно зменшити опір тер- мометра, зєднувальних і подовжувальних дротів, щоб їх частка в загаль- ному опорі всього кола була незначною. Для цього електроди термопари виготовляються в більшості випадків з якнайтовстішого дроту (2-3 мм), а подовжуючи дроти використовують перерізом до 2,5 мм2. В цьому випадку опір зовнішнього кола не перевищує 3-5 Ом. Опір мілівольтметра робиться в сотні раз більшим, ніж опір зовнішнього кола.

3 4 2



Rр Rд

t0

R

п

t1 Рисунок 2.5 – Підключення термопари до

мілівольтметра.

1 1 – термопари; 2 – мілівольтметр;

3 – компенсаційні дроти; 4 - зєднувальні дро- ти.

t

Тут Rд – додатковий манганіновий опір для зменшення температур- ного коефіцієнта мілівольтметра. Таким чином, зміна опору кола термопа- ра-мілівольтметр, що викликається зміною температури оточуючого сере- довища, значно зменшена, а разом з нею зменшені і температурні похибки вимірювальної системи.

Компенсаційний метод ґрунтується на врівноваженні термо-е.р.с., яка вимірюється, падінням напруги, значення якої може бути визначено дуже точно.

На рис. 2.6 зображено найпростіший варіант компенсаційного метода вимірювання термо-е.р.с.

Джерело е.р.с. (термопара) Ет підключена до дільника напруги Rp, що живиться від джерела струму Е таким чином, що падіння напруги Uab на дільнику включено назустріч Ет. Змінюючи величину плечей Rp можна знайти положення, коли Uab = Ет. Тоді термо-е.р.с. Ет буде скомпенсована, а нуль-прилад НП покаже нуль. Щоб визначити значення термо-е.р.с. Ет, потрібно визначити падіння напруги: Uab = ІRab. Значення струму І, що протікає в робочому контурі, може бути визначене за показами міліампер- метра.

a



НП

b

\_

\_

Eт

Rp

+

+

mA

с

E

Рисунок 2.6 – Компенсаційний метод вимірювання термо-е.р.с.

Коли термо-е.р.с. вимірюють просто мілівольтметром, опір ко- ла впливає на результати вимірювань. Тут цього не відбувається але необ- хідно, щоб клас точності міліамперметра був якомога вищим.

Цього недоліку позбавлена схема з постійною силою робочого стру-

му (рис.2.7). Е





+

Ry

Rk

b

Rр

a

m

c



НГ

+

s

К

В



+

НЕ

Ет

Рисунок 2.7 – Потенціометр з постійною силою робочого струму

Потенціометр живиться від джерела струму напругою Е, значення робочого струму може змінюватися змінним резистором Ry. Для точної установки робочого струму падіння напруги на резисторі з відомим опо- ром Rk порівнюється з е.р.с. нормального елемента НЕ. Нормальний еле- мент – електрохімічне джерело ЕРС, яка відома з високим ступенем точно- сті, наприклад 1,0186 В. Для контролю правильності роботи та наладки схеми, в схемі з е.р.с. НЕ порівнюється падіння напруги на резисторі Rk.

Перемикач стоїть в положенні „Контроль” (К). Якщо стрілка нуль- гальванометра відхиляється від середнього значення, то за допомогою ре- зистора Rу добиваються рівності падіння напруги на ділянці аb (Uab) з е.р.с. НЕ. Після цього перемикач переводиться в положення „Вимірювання” (В) і термо-.е.р.с. Ет термопари врівноважується падінням напруги на ділянці bc зміною опору резистора Rр. Якщо значення Rр, Rk і Ене залишаються ста- лими а зміна опору в резисторі Rр є лінійною, то положення реохорда ре- зистора Rр можна відградуювати в одиницях падіння напруги (мВ), а потім за таблицями визначати температуру гарячого спаю термопари.

Переваги схеми:

* незалежність показів від зміни опорів зовнішнього кола;
* підвищення точності вимірювань зп\а рахунок підвищення точності установки струму (Ене0,01%;  Rне 0,02%);
* гранична похибка потенціометрів становить 0,05% і менше.

Крім ручних існують ще й автоматичні потенціометри, які можуть проводити вимірювання без участі оператора, в автоматичному режимі.

f



Rу

І2

І1

ДСЖ

Rн

е

Rм

b'Rb b''

а

Rб

d

РД

b

З Б

К І

-

+ Е

1

2

Рисунок 2.8 – Схема автоматичного потенціометра:

Автоматичний потенціометр застосовується для компенсаційних ви- мірювань термоелектрорушійної сили (термо-е.р.с.) без участі людини. В них поправка на температуру вільних кінців вводиться автоматично. Жив-

лення вимірювальної схеми виконується від джерела стабілізованого живлення.

Термо-е.р.с. термопари (Ет) врівноважується падінням напруги на ді- лянці b-e. Якщо Ub-e  Eт, то на вхід електронного блоку надходить різниця

сигналів

U  Ube  Eт , яка в електронному блоці перетворюється з пос-

тійного струму в змінний та підсилюється за напругою та потужністю. Ре- зультуючий вихідний сигнал з електронного блоку надходить на реверсний

двигун, який переміщує повзун реохорду так, щоб U = 0, тоді Ub-e = Ет .

Разом з переміщенням повзунка реохорду переміщується стрілка приладу та перо на папері. Стабілізує робочий струм джерело стабілізованого жив- лення ДСЖ. Для автоматичного введення поправки на температуру віль- них кінців є опір Rм.

* 1. Термометри опору та методи вимірювання опорів

Для вимірювань порівняно невисоких температур (не більше 650 °С) часто застосовують термометри опору, принцип дії яких заснований на властивості металів і напівпровідників змінювати свій електричний опір при зміні температури. Параметр, що характеризує зміну електричного опору з зміною температури називають температурним коефіцієнтом елек- троопору. Для матеріалів, в яких температурний коефіцієнт не залежить від температури він визначається

 = (Rt – R0)/(R0t), (2.6)

де: Rt і R0 опір для температури t і 0С. Для матеріалів в яких ТКО зале- жить від температури, для кожного значення температури він визначається

 = (1/R0)/(dRt/dt). (2.7)

Розмірність ТКО: С-1, або К-1. для більшості чистих металів він зна- ходиться в межах 0,0035-0,0065 К-1. Для напівпровідників ТКО на порядок більший і має відємне значення: -(0,01-0,15) К-1.

Отже, за нагрівання металів їхній опір збільшується у вигляді насту- пної лінеаризованої залежності

Rt=R0(1+α t). (2.8)

Матеріали для термометрів опору мають відповідати тим же вимо- гам, що й термопарні матеріали: стабільність градуювальної характеристи- ки і її відтворюваність. Якщо ці умови не виконуються, то матеріал вико- ристовувати для датчиків не можна. Всі інші вимоги: лінійність характери- стики, високий питомий опір тощо є не обовязковими, а бажаними. Зараз для датчиків використовують мідь, платину та нікель. Найчастіше для не- високих температур використовують мідь: вона дешева, пластична, має практично лінійну характеристику (2.8). Недоліки: вона має невеликий пи-

томий опір (=1,710-8 Омм) і окисляється, тому датчики з міді використо- вують до температур 200С.

Термометри опору з металів виготовляють шляхом намотки тонкого дроту на каркас з ізоляційного матеріалу. Для захисту від пошкоджень дріт разом з каркасом поміщають в захисну оболонку.

Мідні термометри опору за вимогами ГОСТ 6651-78 можуть викори- стовуватись для тривалого вимірювання температур від -200 до 200С. Во- ни випускаються ІІ і ІІІ класів. Номінальні опори для 0С складають 10, 50 і 100 Ом, і маркуються 10М, 50М, 100М.Межа допустимої основної похиб- ки вибирається з ряду: 0,2; 0,3; 0,5; 1; 2; 3; 5; 10 і 20С. Для термометрів ІІ класу це, як правило 0,3 чи 0,5С, а для ІІІ класу 1 або 2С.

Нікелеві термометри опору випускаються ІІІ класу і працюють в ін- тервалі -60 - +180С. Номінальні опори 50Н і 100Н. Нікель має високий ТКО і високий питомий опір, що дозволяє виготовляти датчики чутливі і з малими габаритами.

Платинові термометри опору використовуються на температурах - 260 - +1100С (ГОСТ 6651-78) і мають наступні опори: 1П; 5П; 10П; 50П; 100П і 500П. Недоліком платини є її забруднення у відновлювальному се- редовищі парами металів та окисом вуглецю при високих температурах.

Напівпровідникові ТО мають температурну залежність характерис-

тики, що може бути описана виразом R

 R exp(B T0  T), де R0 визначає

T0T

T 0

опір термометра для температури Т0 (як правило 20С). Оскільки сучасні технології не дозволяють отримувати напівпровідники з ідентичними ха- рактеристиками, всі напівпровідникові перетворювачі мають індивідуальні градуювальну характеристики.

* 1. Способи підключення термометрів опору

Принцип дії ТО базується на залежності між температурою та актив- ним опором металевого провідника. Опір вимірюється логометром чи врі- вноваженими мостами, що градуйовані в градусах Цельсія.

ТО випускаються двох моделей: одинарні і подвійні. У подвійному термометрі в арматуру вмонтовані два чутливих елемента, електрично не пов’язаних між собою. Кожний чутливий елемент має свою пару затиска- чів в головці термометра, до якої підключається вторинний прилад.

R R



Л1

Л2

л

Rл

к

л

Л1

Л2

Rл

Rл

Л3

Л2

Л1

л

Rл

Rл

Rп

R

а)

б)

Рисунок 2.9 – Схема підключення ТО

а) – дво- та тридротова схеми підключення ТО

б) – схема підгонки опорів дротів дводротової лінії

Особливістю використання ТО є те, що під час вимірювання через ТО повинен проходити струм. При цьому за законом Джоуля-Ленца виділяється тепло Q=I2R , яка нагріває термометр до більш високої температури, ніж темпе- ратура вимірюваного середовища, що викликає відповідну зміну його опору.

Мостові схеми підключення ТО

Бувають врівноважені – коли за трьома відомими опорами визнача- ють четвертий – невідомий, та неврівноважені, для безпосередніх вимірю- вань застосовуються рідко, але знайшли широке використання в газоаналі- заторах, концентратомірах тощо. Найпоширенішими є двоплечові врівно- важені мости, коли рухомий контакт входить в вимірювальну діагональ. В цьому випадку в момент рівноваги струм у вимірювальній діагоналі дорів- нює нулю і тому опір перехідного контакта змінного резистора на впливає на результат (рис 2.10)

Щоб установити залежність між значеннями елементів схеми скори- стаємось теоремою про еквівалент-



R2

а Rг

R3

с

d

R1

b

R4

U ний генератор, згідно з якою струм Icd дорівнює напрузі холостого ходу

Ucd

поділеному на суму опорів ді-

Рисунок 2.10 – Принципова схема моста

лянки cd і опору між кінцями діль- ниці cd при короткому замиканні всіх ЕРС в колі. Тоді струм, що протікає через вимірювальний при-

лад в діагоналі c-d визначається формулою

I  Ucd

U R1

 R1  R2

* U R4

R3  R4 

cd R  R

R1R2

R3R4

г (cd)к.з.

Rг  R  R

* R  R

(2.9)

1 2 3 4

 U R1R3  R2R4

Rг (R1  R2 )(R3  R4 )  R1R 2 (R3  R 4 )  R3R 4 (R1  R 2 )

З цього виразу витікає, що можливі два режими роботи моста:

1. рівноважний, коли зміна опору одного або декількох резисторів доби- ваються виконання умови І=0, яке можливе, коли: R1R3=R2R4;
2. нерівноважний, коли: І=f(U,R1,R2,R3,R4,Rг). В цьому випадку, якщо не- обхідна однозначна залежність вимірювального струму від опору якогось резистора, необхідно, щоб усі інші елементи схеми мали сталі значення.

Для врівноваження мо-

Б



R1

R3

R2

а

Rл

b

RT

Рисунок 2.11 – Схема включення ТО в тридротовий міст

ста вимірюється опір зразу двох плечей або співвідно- шення опорів плечей. Найпо- пулярнішою є тридротова схема включення термометра. Використання третього зєднувального дроту ab переміщує одну з вершин моста базпосередньо в головку термометра, в результаті чого вдвоє зменшується опір лінії, що входить разом з терометром у вимірювальне плече моста і тому частково знижується похибка вимірювань. Якщо

R1 і R2 рівні (симетричний міст), використання трипровідної схеми повністю виключає вплив опору Rл. В цьому випадку, при рівновазі моста:

R1(RT+0,5Rл)=R2(R3+0,5Rл), (2.10)

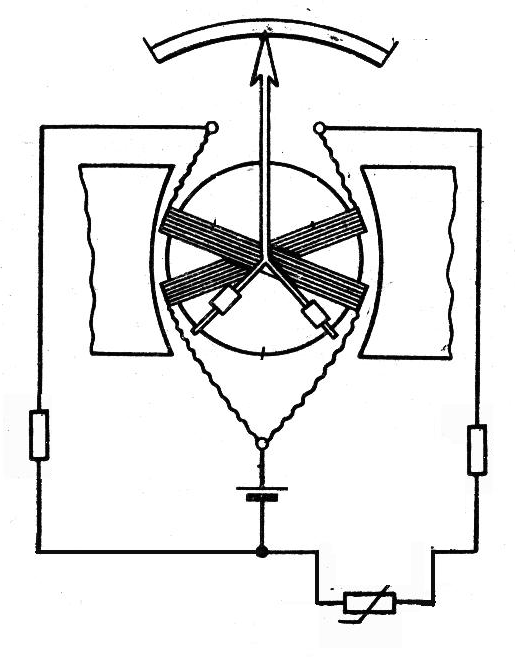
або, після скорочення RT=R3.

* 1. Логометр

Принцип дії логометра базується на вимірюваннях відношення стру- мів в двох ланцюгах. В один з них включений термометр опору, а в другий

– постійний опір.

**7**



**6**

**M1 3 M2**

**1 2**

**4 5**

1,2 – рамки;

3 – стрілка;

4,5 – полюсні наконе- чники;

1. – шкала;
2. – осердя.

**R1**

**↑I1**

**R2**

**+ E I2 ↑**

**-**

**Rt**

**t0**

Рисунок 2.12 - Логометр

U

R1

R4

R5

R2

R6

Rр'

Rр''

R3

Rк

Rt

t0

Рисунок 2.13 - Симетрична мостова схема логометра

Логометр складається (див. рис.2.12) з двох рамок 1 і 2, які жорстко скріплені між собою та з стрілкою 3. Рамки розміщені в повітряному зазорі між полюсними наконечниками 4 і 5 постійного магніта та осердям 7. Цей зазор нерівномірний і тому значення магнітної індукції в різних точках за- зору будуть різними.

Повітряний зазор (clearance) зміщений від центра до країв полюсних

наконечників і, відповідно, від центру до країв наконечників зростає магні- тна індукція у зазорі. Обидві рамки живляться від одного джерела постійного струму, а їх обертаючі моменти направлені на зустріч один одному.

M1=2r1n1l1B1y1, (2.11)

M2=2r2n2l2B2y2, (2.12)

де M1, M2 – обертаючі моменти рамок.

Рівновага буде, коли M1 = M2.

Тут r1=r2, n1=n2 – число витків в рамці, l1=l2 – довжина витка.

В1І1=В2І2, (2.13)

де В – магнітна індукція,

де φ – кут оберту рамки.

B2  f  , (2.14)

B1

Відношення I1

I2

залежить від опору резисторів.

  FRt  , (2.15)

де Rt – опір термометра опору.

Зміна температури змінює опір резистора, змінює відношення I1 і

I2

змінює рівновагу рухомої системи. Для підвищення чутливості застосову- ють логометр з симетричною мостовою схемою. Резистор R4 зроблений з міді і дозволяє зміни в бік зменшення температурного коефіцієнту прила- ду. Опори R1 = R2. Резистори R3 і R5 служать для встановлення діапазону вимірювань. R6 потрібний для підгонки опору з’єднувальних дротів до гра- дуйованого значення. Для цього Rт закорочується, а з Rк знімається зако- ротка. Опір Rк дорівнює опору термометра, який відмічений на шкалі чер- воною рискою. Тому при включенні Rк замість Rт стрілка логометра по- винна стати на червону риску, якщо опір з’єднувальних дротів буде рів- ним градуйованому. Коли ця умова не виконується, то підгонним резисто- ром змінюється опір ланцюга до того моменту, поки стрілка не стане на червону лінію.

* 1. Пірометри

У розглянутих раніше термометрах (термометри розширення, термо- електричні, опору) передбачається безпосередній контакт між їхнім чутли- вим елементом і вимірюваним середовищем. Верхня межа таких контакт- них методів виміру обмежується температурою 1800 °С. Для визначення

більш високих температур без безпосереднього контакту термометрів з вимірюваним середовищем застосовують пірометри. Шкали пірометрів градуюють за випромінюванням абсолютно чорного тіла. Оскільки всі фі- зичні тіла випромінюють меншу енергію, ніж чорне тіло, пірометри пока- зують температуру більш низьку, ніж дійсна температура нагрітого тіла.

За принципом дії розрізняють пірометри оптичні (монохроматичні) і радіаційні (повного випромінювання).

В оптичних пірометрах порівнюється яскравість випромінювання певної довжини хвилі нагрітого тіла, температура якого виміряється, і ро- зжарення нитки спеціальної фотометричної лампи, вбудованої в прилад. Порівняння інтенсивності відбувається після пропускання випромінюван- ня обох тіл через червоний світлофільтр. Пірометри відносять до візуаль- них приладів.

1



2

4

1

5



3

Рисунок 2.14 – Схема оптичного пірометра із "зникаючою" ниткою 1 – об’єктив; 2 – окуляр; 3 – оператор;

4 – "зникаюча" нитка; 5 – регулятор потужності; 6 – об’єкт.

Існує інший тип оптичних пірометрів - фотоелектричні ФЕП, що ви- пускаються класом точності 1. У них яскравісні температури об'єкта й нит- ки порівнюються фотоелементами або фотоопорами, а вимірювання вико- нується потенціометрами.

Дія радіаційних (повного випромінювання) пірометрів базується на фокусуванні теплового випромінювання тіла за допомогою телескопа ста- ндартного типу (наприклад, ТЕРА) у місці робочих спаїв термобатареї, встановленої в ньому. Виникаюча термо-е.р.с. надходить на вторинний прилад - мілівольтметр або автоматичний потенціометр.

# МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ. ТЕПЛОМІРИ

Вимірювання витрати і кількості теплоти відіграє важливу роль при автоматизації систем теплопостачання. Прилад, що вимірює кількість теп- лоти, перенесеної теплоносієм в одиницю часу, називається тепломіром.

Прилад, що вимірює кількість теплоти, перенесеної теплоносієм за деякий проміжок часу, називається тепловим лічильником.

У теплоенергетиці може вимірятися або витрата теплоти з потоком теплоносія (теплова потужність потоку), або кількість теплоти, що вироб- ляється чи споживається різними установками. У першому випадку витра- та j визначається через масову витрату Gm і ентальпію h потоку відповідно до відомого виразу:

ку.

q = Gmh. (3.1)

Тепломіри, що реалізують цей вираз, називаються тепломірами пото-

В другому випадку витрата теплоти може бути визначена як різниця

теплових потужностей на вході і виході установки:

q = (Gmh)вх - (Gmh)вих.. (3.2) Тепломіри, що реалізують це вираження, називаються різницевими.

При рівності витрати теплоносія на вході і виході останнє вираження спрощується:

q = Gm(hвх – hвих). (3.3)

Прямий трубопровід Зворотній трубопровід

1



3

4

2

5

І вих

6

Рисунок 3.1 - Функціональна схема теплового лічильника 1,2 – електромагнітний витратомір; 3,4 – термометри опору; 5 - обчислювальний пристрій, 6 – показуючий прилад

* 1. Використання енергії зміни агрегатного стану

Калориметричні вимірювання дозволяють визначати енергії змін аг- регатних станів у широкому діапазоні фізичних параметрів з точністю не гірше 1 %.

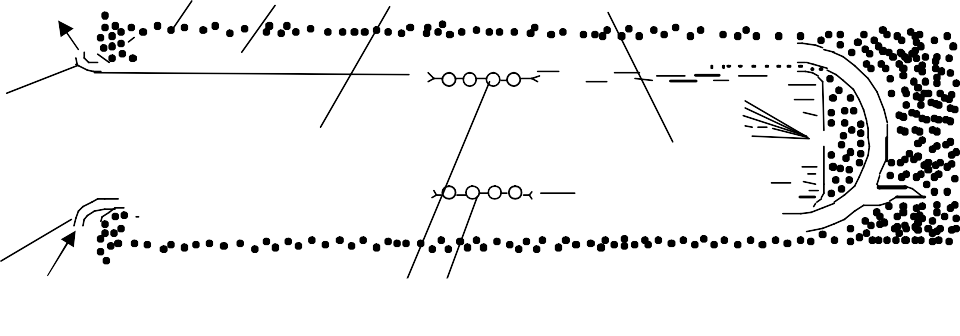
Для фізичних експериментів особливо зручні перетворення твердої фази в рідку й назад. Лінія таких переходів для більшості речовин звичайно значно віддалена від потрійної точки й збігається з ізотермою, а енергіями стиснення для твердих і рідких середовищ можна знехтувати. Тому енергія агрегатного перетворення практично не залежить від тиску.

* 1. Рідинно-ентальпійний метод

Цей метод заснований на тому, що під дією вимірюваного теплового потоку змінюється тепломісткість рідини, що охолоджує приймальний ор- ган. Він застосовується так само часто як і методи, засновані на зміні агре- гатного стану. Відмінність їх у тому, що для визначення зміни інтегральної тепломісткості крім витрат охолоджувального середовища необхідно вимі- рювати зміну температури. Останнє пов'язане з великими труднощами - там де підводиться (або відводиться) вимірюване тепло, температура не- минуче розподілена нерівномірно в охолоджувальному середовищі. Якщо ж середовище встигає досить добре перемішатися (на що потрібен час) - впливають втрати й збурення.

При вимірюванні променистої енергії в атмосфері застосовується так званий водоструминний актинометр (піргеліометр), запропонований в 1900 р. В. А. Міхельсоном і розроблений в 1905 р. Ч. Г. Абботом (рис.3.2).

1 2 3 4



8

7

6 5

Рисунок 3.2 – Водоструминний піргеліометр Ч. Г. Аббота:

1 - корпус приладу; 2 - посудина Дьюара; 3 - калібрована частина;

4 -приймально-поглинаюча частина; 5 - термометричний пристрій на вході; 6 - термометричний пристрій на виході; 7 - вхід охолоджувальної води;

8- вихід охолоджувальної води.

Приймач виконаний у вигляді порожньої конічної моделі абсолютно чорного тіла, омиваною водою. Для зменшення похибок вимірювання тем- пература охолоджувальної води підтримується на рівні температури на- вколишнього повітря.

Для дослідження тепловіддачі від струменя гарячого газу до охоло- джуваної плити при різних умовах натікання струменя Перрі використовував мініатюрний водяний калориметр, схема якого представлена на рисунку 3.3.

1



2

3

4

5

Рисунок 3.3 – Схема водоструминного тепломіра Перрі

1 – прийомна пластинка; 2 – корпус тепломіра; 3 – вхідний патрубок охолоджувальної води; 4 – сальник диференціальної термопари; 5 – вихідний патрубок охолодної води.

Плита, що обдувається гарячим струменем, охолоджувалася проточ- ною водою. Власне тепломір (металева пробка діаметром 16,5 мм) встав- лявся в отвір у плиті на слюдяній теплоізоляційній прокладці товщиною 0,1 мм. Підвищення температури води, що охолоджує тепломір, вимірялося хромель-константановою батареєю з 40 термопар. Перевага пристрою по- лягає в тому, що температура поверхні тепломіра не відрізняється від тем- ператури сусідніх ділянок плити. Отже, тепломір не вносить збурень у теп- лову й гідродинамічну картину досліджуваного явища.

* 1. Електрометричний метод

В експериментальній практиці часто використовують електронагрі- вальні пристрої. Переваги їх полягають у простоті регулювання, компакт- ності й високій точності вимірювань енергії, що підводиться. Для створен- ня контрольованого теплового потоку на досліджуваній ділянці поверхні необхідна надійна ізоляція, яку можна одержати, застосовуючи охоронні й компенсаційні нагрівачі. Організація ефективного контролю втрат тепла

ускладнює експеримент і робить установку громіздкою.

Одна з перших вдалих пропозицій належить М. В. Кірпічову. При вивченні тепловіддачі від циліндра, що обдувається поперечно, він щільно розташовував по твірній ряд платинових смужок. Кожна смужка одночас- но виконувала роль нагрівача, тепломіра й термометра опору. Оскільки циліндр повністю оточений нагрівачами, витоком тепла від смужок у тіло циліндра-основи можна знехтувати.

* 1. Дилато-резистометричні й термоелектричні методи

Основний принцип дилатометричних методів можна пояснити на прикладі актинометра (actinometer) Калітіна (рис. 3.4).



Рисунок 3.4 – Схема монометалічного актинометра Калітіна

На інваровій стійці закріплюється чорнена константанова стрічка. У середній частині ця стрічечка відтягається убік пружиною. При підвищенні температури стрічечки збільшується її стрілка провисання під дією зусилля пружини. Зміна стрілки провисання реєструється індикатором. Стрічечка кріпиться на ізоляторах, завдяки чому прилад можна градуювати по поту- жності електричного струму, що пропускається через неї. При малій тов- щині стрічечки кінцеві ефекти за рахунок теплопровідності незначні.

В 1887 р. Бойс запропонував замкнути накоротко термоелектричний контур і, помістивши його в магнітне поле, використовувати як рамку га- льванометра. Схематичне креслення такого пристрою, названого автором мікрорадіометром, наведений на рисунку.

Рамка підвішена на кварцовій нитці, що за однакової міцності елас- тичніша за металеві підвіски гальванометрів.

Радіометрична система, у якій зміна температури під дією вимірюва- ного випромінювання реєструється за допомогою термометра опору, нази- вається болометром.



1

2

3

4

5

6

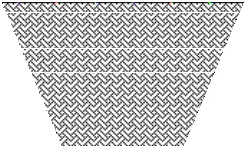
7

Рисунок 3.5 – Мікрорадіометр Бойса:

1 – вікно; 2 – дзеркало; 3 – контур-рамка; 4 – магніт; 5 – корпус; 6 – приймальна площадка; 7 – термоспай.

* 1. Евапорографічний метод

Одна з перших спроб одержання зображень в інфрачервоному світлі евапорографічним методом була успішно здійснена М. Чорни (рис.3.6).



1

2

3

4

5

Рисунок 3.6 – Інфрачервона камера М. Чорни 1 – пробка; 2 – скляна труба; 3 – нагрівальна спіраль;

4 – випарна посудина; 5 – прийомна мембрана.

Робоча камера утворюється в скляній трубі 2 діаметром 50 мм і дов- жиною 150 мм. Верхній край труби на пальнику обробляється під коркову пробку 1, нижній – заполіровується й на ньому кріпиться целулоїдна мем-

брана 5 товщиною 0,5 мкм, покрита знизу скипидарною сажею.

У камері на нагрівальній спіралі 3 підвішена мініатюрна скляна про- бірка 4, заповнена камфорним маслом, нафталіном або яким-небудь важ- ким вуглеводнем.

Для підготовки камери включають нагрівальну спіраль 3. Вуглево- день, що заповнює пробірку, плавиться, поступово випаровується й осідає тонким шаром на стінках камери й целулоїдній мембрані 5. Нагрівання пробірки припиняють, коли осідаючий білий матовий шар рівномірно зга- сить власну інтерференційну картину плівки.

При експонуванні зображення на чорнену сторону плівки зі зворот- ної сторони плівки сублімує камфора зі швидкістю, пропорційної енерге- тичної освітленості ділянки. У такий спосіб були отримані перші довго- строкові видимі зображення предметів в інфрачервоному світлі.

Для візуального спостереження картин, експонованих в інфрачерво- ному світлі, масляну плівку висвітлюють "холодним" видимим світлом. Ро- здільна здатність доходить до 14 ліній на 1 мм при різниці температур у 10 граду- сів. За кольором інтерференційних полів можна з великою точністю судити про енергетичну освітленість ділянки, а виходить, і щільності падаючої енергії.

Деякі попередньо збуджені люмінофори під дією інфрачервоного випромінювання починають світитися у видимій частині спектра. Ця влас- тивість була покладена в основу метаскопа і може бути застосована для по- рівняльних оцінок потоків довгохвильової енергії.

* 1. Пневматичний і оптичний методи

В основу приладів пневматичного методу покладені газові термомет- ри, які мають найвищу чутливість і точність вимірювань.

На відміну від метрологічних газових термометрів об'єми прийомних камер пневматичних індикаторів променистої енергії зазвичай не переви- щують 1 см3, а інтегральна теплоємність дорівнює 10-3 Дж/град. Такі малі значення відповідають теплоємності найтонших (0,02–0,05 мкм) плівкових огороджень робочих об'ємів і дозволяють при великих значеннях потоків досягати зниження постійної часу до мілісекунд. Чутливість по температу- рі може бути доведена до 10-5 град. При проектуванні приладу на тривалі експозиції порядку 100 секунд це дає можливість реєструвати гранично малі потоки порядку 10-10 Вт.

Гази поглинають променисту енергію лише у вузьких смугах спект- ра. Для розширення спектра поглинання прийомну камеру заповнюють во- рсистим поглиначем (найтоншим пухом рослинного або тваринного похо-

дження) і наступною термообробкою домагаються його обвуглювання. Такий вугільний "пух" за помірної теплоємності має значну поглинальну здатність і його присутність більше підвищує чутливість, ніж інерційність приладу.

У пневматичних приймачах зі збільшенням чутливості зростає й пос- тійна часу.

* 1. Інерційні тепломіри

Перші калориметричні прилади (Лавуазьє, Лапласа, Бунзена й ін.) були призначені для визначення теплоємності по кількості тепла, що виді- ляється, та зміні температури. Наявність відомостей про теплоємність до- зволяє вимірювати кількість поглиненого або втраченого тепла по зміні те- мператури вимірювального тіла у часі.

Недолік описаних приймачів полягає в тому, що з їхньою допомогою не можна визначити напрямок вектора вимірюваної величини.

* 1. Фотоелектричні і радіометричні тепломіри

Для приладів на фотоелектричних ефектах, характерний безпосеред- ній перехід променистої енергії фотонів в енергію електронів, що звільню- ються. Головним їхнім недоліком є значна спектральна неоднорідність чу- тливості.

Практичне застосування знаходять приймачі, що використовують наступні ефекти:

а) зовнішній фотоелектричний ефект, при якому поглинання фотона тонкою металевою плівкою супроводжується емісією електрона в прилег- лий вакуумований або розріджений простір;

б) внутрішній фотоелектричний ефект, при якому поглинання квантів випромінювання супроводжується виділенням вільних електронів, здатних накопичуватися усередині твердого тіла у вигляді помітної різниці електричних потенціалів;

в) внутрішній фотоелектричний ефект, що супроводжується поміт- ною зміною електричного .опору.

Елементам всіх трьох підгруп властива селективність сприйняття, тому вони, як правило, застосовуються з вузькосмуговими світлофільтра- ми, як це має місце, наприклад, у серійних пірометрах ФЭП-3 і ФЭП-4.

Гранична чутливість фотоопорів до монохроматичного випроміню- вання на два порядки вище, ніж у болометрів, а постійна часу виміряється мікросекундами. Тому фотоопори застосовуються найбільше часто для

виміру гранично малих потоків, коли чутливість прийомного елемента стає головною необхідною властивістю.

* 1. Компенсаційні радіометри

Компенсаційні прилади можна класифікувати на одно- і двохелемен- тні. Найчастіше теплова компенсація здійснюється за допомогою електри- чного нагрівання. В одноелементних приладах за допомогою компенсацій- ного нагрівання здійснюється періодичне градуювання елемента, чутливо- го до вимірюваного потоку. При далекій аналогії ці прилади подібні до пружинних вагів, що перевіряються періодично по еталонних гирях.

Двохелементні радіометри створені на основі диференційного кало- риметра. Чутлива ланка дозволяє контролювати ідентичність підведення енергії. Один з елементів сприймає вимірюваний потік, другий - компен- саційне електричне нагрівання. Принципова основа цих приладів така ж, як і двоплечих важільних вагів.

* 1. Метод допоміжної стінки

Суть методу полягає у тому, що на шляху вимірюваного потоку роз- ташовується стінка з відомою теплопровідністю. Залишається визначити питомий тепловій потік

q   t . (3.4)



Зазвичай, ефект присутності вимірювального органа бажано звести до мінімуму, тому допоміжна стінка, за можливістю, не повинна бути до- датковою, як її іноді називають. У тих же випадках, коли додатковий опір не- минучий, необхідно знати не тільки абсолютну величину, але і його частку в сумарному тепловому опорі теплового кола, що проводить вимірюваний потік.

* 1. Тепломіри з поперечною складовою потоку

У цих приладах сприйнятий потік повністю або частково проходить через допоміжний орган, змінюючи свій первісний напрямок.

Схема приладу Р. Гардона представлена на рисунку 3.7. Отвір у мід- ному блоці 2 закрито константановою пластиною 1, припаяною по перифе- рії до блоку. Енергія, сприймана константановою фольгою, частково розті- кається радіально до мідного блоку, а частково втрачається в навколиш- ньому середовищі. Гарячий спай утвориться в центрі пластинки із припая-

ним мідним дротом 3. Товщина константанової пластинки зазвичай менше 0,3 мм. Тому стаціонарний режим наступає порівняно швидко. Графік змі- ни температури по радіусу фольги представлений у правій частині рисун- ка. Максимальна температура t1 відповідає центру, а мінімальна t2 — блоку. За допомогою диференціальної термопари, складеної з мідного централь- ного дроту, константанової фольги й мідного блоку, виміряється різниця температур Δt за величиною якої судять про інтенсивність потоку енергії, що сприймається датчиком.



2

t2

3

1

t

t1

Рисунок 3.7 – Схема датчика Р. Гардона

1 – прийомна пластина; 2 – мідний блок; 3 – струмознімальний провідник

* 1. Аналітичні методи

Стосовно до явищ теплопровідності диференціальне рівняння, гра- ничні і початкові умови однозначно описують температуру даного тіла в будь-якій точці в довільний момент часу. У силу однозначності такого зв'язку знання температури, наприклад, у двох точках у довільні моменти часу дозволяє визначити граничні умови по одному з параметрів (напри- клад, потоку або температурі на границях). Такий підхід у рішенні зазви- чай прийнято називати зворотною задачею теплопровідності.

* 1. Піроелектричні тепломіри

Піроелектрикою називається стан електричної поляризації, що обу- мовлена зміною температури й співпадає з оптичною полярністю. Уперше це явище спостерігалося на мінералах групи турмаліну, для яких головна вісь симетрії кристалів є головної піроелектричною віссю. Зміна темпера- тури на 1 градус по цій осі приводить до появи заряду до 10-5 Кл/м2.

# 4 МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ РІЗНИЦІ ТИСКІВ ТА РОЗРІДЖЕННЯ

Широке використання тиску в наукових дослідженнях і в різних га- лузях промисловості викликає необхідність застосування великої кількості засобів вимірювання тиску й різниці тисків, різних за принципом їхньої дії, конструкцією, призначенню й точності. При вимірюванні тиску нас мо- жуть цікавити абсолютний, надлишковий й вакуумметричний тиски.

Основною одиницею вимірювання тиску є Паскаль: 1 Па = 1 Н/м2, який складає приблизно одну стотисячну частку атмосферного тиску. Ця одиниця досить зручна для вимірювання розріджень, але мало практична для більшості інших випадків. Для вимірювань атмосферного тиску вико- ристовують барометри, котрі можуть бути проградуйовані або в мілімет- рах ртутного стовпчика (1 мм.рт.ст. = 133,332 Па), або в кілопаскалях (1 кПа = 1000 Па). Барометричний тиск, як правило, позначається літерою В.

Під терміном абсолютний тиск мається на увазі повний тиск, під яким перебуває рідина, газ або пара. Він дорівнює сумі надлишкового тиску Рм і атмосферного тиску В:

Р = Рм + В. (4.1)

Надлишковий тиск дорівнює різниці між абсолютним тиском, біль- шим атмосферного, і атмосферним тиском.

Під терміном вакуумметричний тиск (розрідження або вакуум) ма- ється на увазі різниця між атмосферним тиском і абсолютним тиском, меншим атмосферного:

Рв = В – Ра. (4.2)

Прилад, що вимірює атмосферний тиск, називають барометром, звід- си атмосферне тиск - барометричним. Прилад, призначений для виміру аб- солютного тиску, називають манометром абсолютного тиску. Прилад, що вимірює надлишковий або вакуумметричний тиск, - відповідно маномет- ром надлишкового тиску й вакуумметром. Прилад, що вимірює малий над- лишковий тиск і розрідження газу називається відповідно напороміром і тягоміром.

Прилад, призначений для вимірювання вакуумметричного й надли- шкового тисків, називають мановакуумметром, а для виміру малих тисків і розріджень газу – тягонапороміром. Прилад, що вимірює дуже малі тиски (нижче й вище барометричного) і незначні різниці тисків, називають мік- романометром; прилад, призначений для виміру різниці тисків, - диференціальним манометром (дифманометром).

4.1 Рідинні прилади тиску з видимим рівнем. U-подібні й чашкові манометри

Для вимірювання невеликих надлишкових тисків еталонним прила- дом є рідинний U-подібний манометр, який можна застосовувати і для ви- мірювання різниці тисків. Надлишковий тиск в U – подібній трубці мано- метра врівноважується стовпом рідини висотою h. Тоді за основним рів- нянням гідростатики надлишковий тиск дорівнюватиме:

Рм = hg , (4.3)

де  – густина рідини в манометрі; g – прискорення вільного падіння.

Як рідину в таких манометрах найчастіше використовують ртуть або воду. Для прецизійних вимірювань такими манометрами необхідно врахо- вувати залежність густини рідини від температури, залежність g від геог- рафічної широти і коефіцієнта термічного розширення матеріалу трубок, з якого виготовлене U – подібне коліно. Такі похибки рідко становлять в сумі більше 0,5% від величини тиску і розрахункові формули для визначення поп- равок до формули (4.3) наводяться в спеціальній літературі.

Прилади U-подібні (двотрубні) і чашкові (однотрубні) належать до групи рідинних приладів з видимим рівнем. Вони застосовуються як мано- метри (напоромери) для виміру надлишкового тиску повітря й неагресив- них газів до 700 мм. вод. ст. (7000 Па) і 735 мм. рт. ст. (0,1 МПа), тягомірів для виміру розрідження газових середовищ до 700 мм. вод. ст. (7000 Па), вакуумметрів для виміру вакууму (розрідження) до 760 мм. рт. ст. (0,101 МПа) і диференціальних манометрів для виміру різниці тисків неагресив- них газів, що перебувають під тиском, близьким до атмосферного, до 700 мм. вод. ст. (7000 Па) і неагресивних рідин, газів і пар, що перебувають під тиском більше 1 0,1 МПа, до 0,09 МПа.

Прилади U-подібні і чашкові використовуються в промисловості як місцеві прилади, тобто вони встановлюються на площадках обслуговуван- ня або на окремих елементах технологічного обладнання, Прилади цього типу застосовують у якості контрольних і зразкових манометрів і вакуум- метрів для перевірки робочих приладів, розрахованих на ті ж діапазони виміру тиску, розрідження або різниці тисків.

В рідинних манометрах вимірюваний тиск або різниця тисків врівно- важується тиском рівня рідини. В приладах використовується принцип сполучених посудин, в яких рівні робочих рідин співпадають при однако- вих тисках над ними, а при різних тисках займають таке положення, коли залишковий (residual) тиск в одній посудині врівноважується гідростатич-

ним тиском надлишкового стовпа рідини в другій. Більшість їх має види- мий рівень робочої рідини і шкалу для зняття показів.

Принципова схема таких манометрів представлена на рис. 4.1. Дві сполучені вертикальні скляні трубки закріплені на основі, на якій розміще- на шкальна пластинка. Трубки заповнені робочою рідиною до нульової ві- дмітки. В одну трубку подається вимірюваний тиск, а інша зєднана з ат-

мосферою. Для вимірювання різниці тисків, вимірювані тиски підводяться до обох трубок. Стовп рідини врівно- важується різницею тисків:



h2

0

h1

P1  P2  gh,

(4.4)

h  1 (P  P ) , (4.5)

h g 1 2

Рисунок 4.1 – Схема U- подібного манометра

де:  - густина робочої рідини;

g – місцеве прискорення вільного па- діння.

Двотрубні манометри з водяним заповненням використовуються для вимірювання тисків, розрідження, різ- ниці тисків повітря і неагресивних се- редовищ в діапазоні 10 кПа. Якщо манометр заповнити ртуттю, то межі

розширюються до 0,1 МПа. Похибка вимірювань залежить від ціни поділ- ки шкали. Без додаткових оптичних пристосувань для ціни поділки шкали похибка зчитування різниці рівнів складає  2 мм з врахуванням похибок нанесення шкали.

В порівнянні з двотрубними, однотрубні манометри мають підвище- ну точність підрахунку. Складаються з трубки із шкалою і широкої посу- дини, в яку подається більший з вимірюваних тисків (рис.4.2). Робоча рі- дина заливається в манометр до нульової відмітки. Оскільки обєм рідини, який витік з широкої посудини дорівнює обєму рідини, що поступив у ви- мірювальну трубку:

h  h2f , (4.6)

1 F

де f і F – площі поперечного перерізу вимірювальної трубки і широкої по- судини. Для f  F h1  h2 і якщо F/f400 то зміною рівня у широкій по- судині нехтують, а у вимірюваннях враховується тільки зміна рівня рідини в трубці. В такому манометрі похибка складає 1 мм. Мінімальний діапа-

зон вимірювання однотрубних манометрів з водяним заповненням 1,6 кПа. Мікроманометри використовують для вимірювання тисків і різниць тисків до 3 кПа. Як правило, виготовляються з похилою трубкою і мають спеціа- льні пристрої або для зниження ціни поділки шкали, або підвищення точ- ності зчитування за рахунок використання оптичних чи інших пристроїв.

h2



0

h1

Рисунок 4.2 – Схема однотрубного манометра

Як робочу рідину (working fluid) звичайно застосовують воду або ртуть, а іноді й інші рідини. Внутрішній діаметр скляної трубки для виго- товлення U-подібного приладу повинен бути не менш 8-10 мм і по можли- вості однаковий по всій її довжині. При малому діаметрі трубки капілярні властивості води не дозволяють застосовувати її як робочу рідину в прила- дах цього типу. У цьому випадку як робочу рідину рекомендується засто- совувати спирт.

При застосуванні U-подібний манометр повинен встановлюватися вертикально по виску.

Для виміру надлишкового тиску в об'єкті праве коліно трубки при- ладу з'єднують із об'єктом, а ліве залишають відкритим (сполучення з ат- мосферою); при вимірі розрідження - ліве коліно приладу з'єднують із об'єктом, а праве - залишають відкритим. При вимірі різниці тисків біль- ший тиск підводить до правого, а менше - до лівого коліна трубки приладу. Зазвичай за допомогою U-подібного приладу тиск, розрідження або різниця тисків вимірюють у міліметрах водяного або ртутного стовпа. Ре- зультат вимірювання може бути виражений не в міліметрах стовпа робочої

рідини, а в паскалях

p  h  g(  c ) , (4.7)

де g – місцеве прискорення вільного падіння, м/с2; h – різниця рівнів робочої рідини, м;

ρ – густина робочої рідини, кг/м3;

ρс – густина середовища над робочою рідиною, кг/м3.

* 1. Мікроманометри

Мікроманометри є переносними приладами, їх застосовують у лабо- раторній практиці й у промислових умовах при проведенні випробувань теплосилових і інших установок для виміру малих тисків, розріджень або різниць тисків повітря й неагресивних газів. Прилади цього типу залежно від їхнього призначення підрозділяються на робочі й зразкові мікромано- метри. Робочі мікроманометри у свою чергу підрозділяються на прилади технічні й підвищеної точності.

На рис. 4.3 показана схема мікроманометра з похилою скляною ви- мірювальною трубкою. Нахил вимірювальної трубки в цьому приладі зроблений з метою зменшення похибки вимірювань. Як робоча рідина в мікроманометрах цього типу застосовують етиловий спирт, що заливають у широку судина настільки, щоб рівень його в похилій трубці перебував проти нульової оцінки шкали. Довжина шкали в мікроманометрів з похи- лою трубкою виконується зазвичай рівною 250 мм.



P

n

h2

h1



Рисунок 4.3 – Схема похилого мікроманометра

При вимірюванні тиску в якому-небудь об'єкті до нього приєднують за допомогою трубки широку посудину приладу, а при вимірюванні розрі- дження - похилу трубку. У випадку вимірювання різниці тисків більший тиск подається в посудину, а менший - у вимірювальну трубку.

h  h1  h2 , (4.8)

h1  n  sin  , (4.9)

де n – довжина стовпа рідини в похилій трубці.

Якщо F1, і F2 – відповідно площа перетину похилої трубки й посуди- ни, ρ – густина робочої рідини, кг/м3; g – місцеве прискорення вільного па- діння, м/с2, то значення вимірюваного тиску (Па) розраховують за форму- лою

p  gh  ngsin   F1  . (4.10)

 F 

 2 

тами

* 1. Прилади для вимірювання тиску із пружними чутливими елемен-

Робота цих приладів базується на використанні деформації або зги-

нального моменту пружних чутливих елементів, що сприймають вимірю- ваний тиск середовища й перетворюють його в переміщення або зусилля Такі прилади застосовують у різних областях техніки в широкому діапазоні вимірювань – від 50 Па до 1000 МПа. Вони виготовляються у вигляді тя- гомірів, напоромірів, тягонапоромірів, манометрів, вакуумметрів і манова- куумметрів. Ці прилади підрозділяються на наступні різновиди:

а) прилади тиску прямої дії – як показуючі, так і самописні, у яких пе- реміщення центра або вільного кінця пружного чутливого елемента, що викликане дією тиску, за допомогою додаткового механізму перетворю- ється в переміщення відлікового пристрою для показання або для показан- ня й запису вимірюваної величини;

б) прилади тиску прямої дії й реле тиску (без відлікових пристроїв), об- ладнані електроконтактами й призначені для вимірювання й сигналізації або тільки сигналізації відхилення тиску від заданого значення, а також для роботи в схемах захисту, блокування або позиційного регулювання;

в) первинні прилади тиску з відліковими пристроями або без них, обла- днані передавальними перетворювачами з уніфікованими вихідними сиг- налами змінного струму або пневматичного і складові із взаємозамінними вторинними що показують або самописними приладами – окремі вимірю- вальні комплекти. Деякі прилади цього типу використовуються також у системах автоматичного регулювання й керування;

г) первинні прилади тиску з відліковими пристроями або без них, обла- днані передавальними перетворювачами з уніфікованим вихідним сигна- лом постійного струму й призначені для роботи із взаємозамінними вто- ринними що показують, самописними або інформаційно- обчислювальними машинами.

Залежно від призначення прилади тиску із пружними чутливими елементами розділяються на зразкові й робочі.

У якості пружних чутливих елементів у приладах тиску використо-

вуються мембрани, мембранні коробки (membrane boxes), сильфони (bel- lows) й трубчасті пружини. Мембрани, мембранні коробки й сильфони за- стосовують як чутливі елементи також і в дифманометрах.

* 1. Пружні чутливі елементи

Плоскі мембрани, виготовлені зі сталі й бронзи, являють собою кру- глі тонкостінні пластини постійної товщини. Під дією рівномірно розподі- леного тиску або зосередженої сили затиснена по краях плоска мембрана прогинається при наявності не тільки згинальних деформацій, але й на- пруг, що розтягують, і внаслідок цього має нелінійну статичну характерис- тику. При використанні плоских мембран в якості робочої ділянки викори- стовується зазвичай невелика частина можливого її ходу.

Плоскі мембрани знаходять застосування головним чином у приладах тиску спеціальних конструкцій, наприклад п’єзокварцових, ємнісних, ін- дуктивних, з тензоперетворювачами тощо. Прилади цього типу мають малу інерційність і їх можна використовувати для виміру змінних тисків із час- тотою до декількох сотень і тисяч герц.

Опуклі (клацаючі) мембрани (рис. 4.4), виготовлені зі сталі або брон- зи, можуть бути використані в реле.

При впливі тиску р на мембрану її прогин λ на початковій ділянці *оеа* статичної характеристики зростає плавно. Далі за збільшення тис- ку відбувається втрата стійкості мембрани й вона змінює свій прогин стри- бком (ділянка *ab* характеристики). При цьому мембрана замикає або роз- микає електроконтакти. При подальшому збільшенні тиску прогин мем- брани на ділянці характеристики *bс* буде знову зростати монотонно. Якщо тиск зменшиться до значення р2, то мембрана також стрибком вертається на ділянку характеристики *ое.* Розміри клацаючих мембран, зазвичай під- бирають дослідним шляхом.

Гофрування (corrugated) поверхні мембрани (рис. 4.5) підвищує на- дійність її роботи й спрямляє характеристику мембрани. Найбільше засто- сування в приладах тиску одержали мембранні коробки, утворені двома спаяними або звареними гофрованими мембранами, і блоки із двох або де- кількох мембранних коробок.

У тих випадках, коли необхідно мати мінімальний обсяг внутрішніх порожнин чутливого елемента, наприклад при вимірюванні перепаду тиску (що є бажаним особливо для дифманометрів-витратомірів), застосовують блок, що складається із двох складних мембранних коробок з рідинним за- повненням.





Р

с

b

g

0

e

а

Р

Р2 Р1

Рисунок 4.4 – Робота клацаючої мембрани

а)

б)

в)

Рисунок 4.5 – Види мембран

а) - синусоїдальна, б) - трапецієподібна, в) - пилкоподібна

Сильфон (рис. 4.6) є тонкостінною трубкою з поперечним гофруван- ням. Сильфони застосовуються в напоромірах і тягомірах для вимірювання невеликого тиску 40 кПа), у приладах для виміру вакуумметричного тиску до 0,1 МПа, абсолютного тиску до 2,5 МПа, надлишкового тиску до 60 МПа і різниці тисків до 0,25 МПа.

2RB

2RН

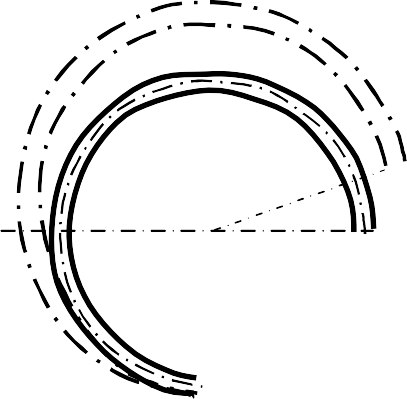
Рисунок 4.6 – Сильфон

Трубчасті пружини найчастіше виконуються у вигляді одновиткових, центральна вісь яких являє собою дугу окружності із центральним кутом*,* рівним 200–270°. Із числа цих пружин найбільш широке застосування оде- ржали пружини Бурдона (рис. 4.7) еліптичного й плоскоовального перети- ну. Один кінець пружини Бурдона закріплюють нерухомо, а інший - віль- ний, закритий пробкою й запаяний - з'єднують із механізмом приладу

Під дією тиску, що подається у внутрішню порожнину трубки, пру- жина Бурдона деформується в поперечному перерізі, приймаючи форму, зображену пунктиром.

Трубчаста пружина тим чутливіша, чим більше радіус її кривизни *RK*

і чим менше товщина δ стінок трубки.



Р

Рисунок 4.7 – Манометр з трубчастою пружиною Бурдона

* 1. Прилади прямої дії для вимірювання тиску

Прилади прямої дії застосовують у широкому діапазоні вимірювання від декількох десятків міліметрів водяного стовпа й до тиску в кілька тисяч атмосфер як у лабораторних, так і промислових умовах.

Під впливом вимірюваного надлишкового тиску пружний чутливий елемент деформується й тягне повідця. Повідець повертає зубчастий сектор і відповідно трибку зі стрілкою. Рухаючись уздовж шкали стрілка показує значення вимірюваного надлишкового тиску. Переміщення вільного кінця пружини, а отже, і кут повороту стрілки практично пропорційні вимірюва- ному тиску, тому шкала таких приладів рівномірна.

* 1. Прилади тиску електричні. П'єзоелектричні манометри

Дія манометрів цього типу базується на використанні п'єзоелектрич- ного ефекту, що спостерігається в ряді кристалів кварцу, турмаліну (tour- maline), титанату барію, сегнетової солі тощо). П'єзоелектричні манометри, що використовують як первинний перетворювач кварц (двоокис кремнію SiО2), знайшли найбільше практичне застосування в порівнянні із прила- дами, що використовують інші кристали, завдяки істотним перевагам ква- рцу, що негігроскопічний, має велику механічну твердість, гарні ізоляційні якості й незалежність п'єзоелектричних властивостей від температури по- рівняно в широкому інтервалі (20 – 400°С).

У кристалі кварцу (рис. 4.8) розрізняють наступні осі: оптичну, що проходить через вершини кристала; електричну, яка проходить через ребра (їх три зі зсувом в 120) та перпендикулярна оптичній; механічну (або нейт- ральну), що розташована нормально до граней кристала (їх також три). Якщо із кристала кварцу вирізати прямокутну пластину із гранями, пара- лельними осям (зріз Кюрі), і піддати її стиску (або розтяганню) уздовж електричної вісі, то на гранях, перпендикулярних цієї вісі, з'являться елек- тростатичні заряди, рівні за значенням і протилежні за знаком. При пере- ході від стиску до розтягання й назад знаки зарядів змінюються на проти- лежні.

z



Оптична вісь



dy

dx

х Електрична вісь

dz

а) у

Механічна вісь

б)

Рисунок 4.8 – Кристал кварцу (а) і пластина кварцу і її осі (б).

П’єзокварцові манометри, що дозволяють вимірювати тиск до 100 МПа і вище, широко застосовуються при вимірах швидкозмінних тисків. При цьому чим швидше протікає досліджуваний процес, тим достовірніше

даний метод. Практично п'єзоелектричний ефект можна вважати безінер- ційним і досить стабільним.

* 1. Манометри опору

Дія манометрів опору ґрунтується на зміні електричного, опору ре- човин під дією зовнішнього надлишкового тиску. До числа таких речовин належать напівпровідники, платина, манганін, константан, вольфрам і ряд інших металів. Для цілей вимірювання тиску, а отже, і виготовлення пер- винного перетворювача (або чутливого елемента), як показали експериме- нтальні дослідження, найбільшою мірою підходить манганін.

Манганін має лінійну залежність збільшення електричного опору від тиску:

R  kRpâ , (4.11)

де k коефіцієнт зміни опору манганіну, 1/Па.

Лінійна залежність опору манганіну підтверджується дослідними да- ними аж до тиску 3000 МПа. Крім того, він має дуже малий температурний коефіцієнт електричного опору, що дає можливість не зважати при вимі- рюванні тиску на зміни температури навколишнього повітря. Невелика чу- тливість перетворювача обмежує застосування цього манометра вимірю- ваннями надвисоких тисків (більше 100 МПа).

Коефіцієнт зміни опору манганіну для різних партій лежить в інтер- валі від 0,23 1/Па до 0,25 1/Па, і манометри з перетворювачем з манганіно- вого дроту потребують індивідуального градуювання.

# 5 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ ТА КІЛЬКОСТІ РЕЧОВИНИ

* 1. Види витрат і витратомірів

Витратою називають кількість речовини, що протікає через перетин трубопроводу в одиницю часу. Кількість речовини можна вимірювати або в одиницях маси [кілограм (кг), тонна (т)], або в одиниця об'єму [кубічний метр (м3), літр (л)]. Відповідно до обраних одиниць може визначатися або масова витрата Gm (одиниці кг/с, кг/год, т/год тощо), або об'ємна витрата Vm (одиниці м3/с, л/с, м3/год, тощо). Одиниці маси дають більш повні ві- домості про кількість або витрату речовини, ніж одиниці об'єму, тому що обєм речовини, особливо газів, залежить від тиску і температури. Коли вимірюються об'ємні витрати газів для одержання порівнянних значень ре- зультати вимірювань приводять до деяких загальноприйнятих (так званих нормальних) умов. Такими нормальними умовами прийнято вважати тем- пературу t=20°С, тиск Р==101 325 Па (760 мм. рт. ст.) і відносну вологість

=0. У цьому випадку об'ємна витрата позначається Vн і виражається в об'ємних одиницях (наприклад, м3/год).

Згідно з ДСТУ ГОСТ 8.586.5:2009 вимірювальний прилад, що слу- жить для виміру витрати речовини, називається витратоміром, а прилад для виміру кількості речовини - лічильником кількості (лічильником), У кожному конкретному випадку до цих термінів варто додавати наймену- вання контрольованого середовища.

Зазвичай в гідромеханіці рідкі й газоподібні речовини поєднують у єдиному понятті „рідини". На відміну від твердих тіл вони здатні змінюва- ти свою форму під дією навіть дуже малих сил. Рідини по своїх механічних властивостях поділяють на мало-стисливі (краплинні) і стисливі (газоподі- бні).

За принципом вимірювань витратоміри класифікують за наступними основними групами (вказується для кожної класифікаційної групи витра- томірів, принцип перетворення належить до їхніх первинних перетворюва- чів - датчиків):

1. витратоміри змінного перепаду тиску (із звужуючими (narrowing) пристроями; з гідравлічними опорами; відцентрові; з напірними пристроя- ми; струминні), що перетворять швидкісний напір у перепад тиску;
2. витратоміри обтікання (витратоміри постійного перепаду - ротамет- ри (VA meters), поплавкові, поршневі, гідродинамічні), що перетворять швидкісний напір у переміщення тіла, яке обтікається струменем середо- вища;
3. тахометричні (tachometric) витратоміри (турбінні з аксіальною або тангенціальною турбіною; кулькові), що перетворять швидкість потоку в кутову швидкість обертання обтічного елемента (лопаток турбінки або ку- льки);
4. електромагнітні витратоміри, що перетворюють швидкість провід- ної рідини, що рухається в магнітному полі, в е.р.с.;
5. ультразвукові витратоміри, засновані на ефекті захоплення звукових коливань середовищем, що рухається;
6. інерційні витратоміри (турбосилові, коріолісові, гігроскопічні), ро- бота яких базується на інерційному впливі маси, що рухається з лінійним або кутовим прискоренням рідини;
7. теплові витратоміри (калориметричні; термоанемометричні), що працюють на ефекті переносу тепла середовищем, що рухається, від нагрі- того тіла;
8. оптичні витратоміри, засновані на ефекті захоплення світла рухо- мим середовищем (Фізо-Френеля) або розсіювання світла рухомими част- ками (Допплера);
9. міткові витратоміри (з тепловими, іонізаційними, магнітними, концентраційними, турбулентними мітками), засновані на вимірі швидкос- ті

або стані мітки при проходженні її між двома фіксованими перетинами потоку.

* 1. Вимірювання витрат й кількості рідин за перепадом тиску в зву- жуючому пристрої. Методика використання звужуючих пристроїв

Одним з найпоширеніший і вивчених є спосіб вимірювання витрат рі- дин, газів і пари в трубопроводах за перепадом тиску в звужуючому при- строї. Звужуючий пристрій виконує функції первинного перетворювача, встановлюється в трубопроводі й створює в ньому місцеве звуження, вна- слідок чого при протіканні речовини підвищується швидкість у звуженому перетині в порівнянні зі швидкістю потоку до звуження. Збільшення шви- дкості, а отже, і кінетичної енергії викликає зменшення потенційної енергії потоку у звуженому перетині. Відповідно статичний тиск у звуженому пе- ретині буде менший, ніж у перетині до звужуючого пристрою. Таким чи- ном, при протіканні речовини через звужуючий пристрій створюється пе- репад тиску Δр = p1 - р2, що залежить від швидкості потоку й, отже, витрат рідини. Звідси випливає, що перепад тиску, створюваний звужуючим при- строєм, може слугувати мірою витрати речовини, що протікає в трубопро-

воді, а чисельне значення витрати речовини може бути визначене за пере- падом тиску Δр, що вимірюється дифманометром.

Стандартні звужуючі пристрої можуть застосовуватися в комплекті з дифманометрами для виміру витрати і кількості рідин, газів і пари в круг- лих трубопроводах (для будь-якого їх розташування), діаметр яких не менший від значень, що складають для газів не менше як 50 мм і для рідин не менше 30 мм, якщо їхній розрахунок, виготовлення й установка викона- ні правильно.

При необхідності використання звужуючих пристроїв на трубопро- водах меншого діаметра вони повинні мати індивідуальне градуювання, тобто експериментально визначену залежність р = f(G).

В якості звужуючих пристроїв для виміру витрат рідин, газів і пари широко застосовують стандартні діафрагми, сопла (nozzle) й сопла Венту- рі. В особливих випадках вимірювань витрат знаходять також застосу- вання ненормалізовані типи звужуючих пристроїв.

Діафрагма (рис. 5.1а) є тонким диском із отвором круглого перерізу, центр якого лежить на вісі труби. Звуження потоку починається до діафра- гми, і на деякій відстані за діафрагмою потік досягає мінімального перети- ну, далі потік поступово розширюється до повного перетину трубопроводу. Суцільною лінією представлена крива, що характеризує розподіл тисків уздовж стінки трубопроводу; крива, зображена штрихпунктирною лінією, характеризує розподіл тисків за віссю трубопроводу. Як видно, тиск за ді- афрагмою повністю не відновлюється.

При протіканні речовини через діафрагму за нею в кутах утвориться мертва зона, у якій внаслідок різниці тисків виникає зворотний рух рідини або так званий вторинний потік (secondary flow). Внаслідок в'язкості рідини струмка основного й вторинного потоків, рухаючись у протилежних напрямках згортаються у вигляді вихорів. На вихороутворення за діафрагмою витрачається значна частина енергії, а отже, має місце й знач- на втрата тиску.

Зміна напрямку струмків перед діафрагмою й стиск потоку після ді- афрагми мають незначний вплив.

Сопло (рис. 5.1, б) виконано у вигляді насадки із круглим концентри- чним отвором. На рис. 5.1 в показане сопло Вентурі.

Необхідно, щоб контрольоване середовище заповнювало весь попе- речний переріз трубопроводу, причому фазовий стан речовини не повинен змінюватися при проходженні через звужуючий пристрій. Конденсат, пил та гази, що виділяються з контрольованого середовища, не повинні нако- пичуватися поблизу звужуючого пристрою.



Р

Р1

Р2

P=P1 - Р2

Рn

Р1

0

A

Р2

В

𝑙

~~В,~~ Р1, v1,

d, F0

Р2, v2, F2

A

В

а)

Р=Р1–Р2

Р

Р1

Р2

P

Рn

Р1

0

Р2

𝑙

A В

F1

а) d~~,~~ F0

F2 = F0

Рисунок 5.1 – Види діафрагм та сопел



A

В

Р

б)

Р1

P

Рn

Р1

0

Р2= P2

𝑙

в)

Відбір тисків р1 і р2 здійснюється за допомогою двох окремих отво- рів, розташованих безпосередньо до й після диска діафрагми в кутах, утво- рених площиною діафрагми й внутрішньою поверхнею трубопроводу (рис. 5.2).

Стандартні діафрагми застосовуються при дотриманні умови 0,05*т*0,64, стандартні сопла - для 0,05*т*0,64 і сопла Вентурі - для 0,05*т*0,6.

б)



𝑙1

𝑙2

в)



a)

D20

Рисунок 5.2 – Способи відбору тисків

D20

D20

а) через окремі отвори; б) через кільцеві камери; в) фланцевий.

Конкретний тип звужуючого пристрою вибирається з розрахунку в залежності від умов застосування, необхідної точності, залишкової втрати тиску. Однак у будь-якому випадку точність вимірювання витрати газів і пари при використанні сопла вище, ніж при використанні діафрагми. Крім того, зміна або забруднення вхідного профілю звужуючого пристрою в процесі експлуатації мало змінює коефіцієнт витрати сопла й у значно бі- льшій мірі змінює коефіцієнт витрати діафрагми.

При установці звужуючих пристроїв необхідно дотримувати ряд умов, що сильно впливають на похибки вимірювань. Звужуючий пристрій у трубопроводі повинен розташовуватися перпендикулярно осі трубопро- воду. Неперпендикулярність не повинна перевищувати 1°. Вісь звужуючо- го пристрою повинна співпадати з віссю трубопроводу. Зміщення осі отво- ру звужуючого пристрою щодо осі трубопроводу не має перевищувати 0,005D/(0,1 +2,3m2).

Ділянка трубопроводу довжиною 2D до і після звужуючого при- строю повинна бути циліндричною, гладкою, на ній не повинно бути ні- яких уступів, а також помітних оку наростів і нерівностей від заклепок, зварювальних швів і т.п. Часто ця ділянка трубопроводу виточується на верстаті разом із встановленим звужуючим пристроєм.

Важливою умовою є необхідність забезпечення сталої течії потоку перед входом у звужуючий пристрій і після нього. Такий потік забезпечу-

ється наявністю прямих ділянок трубопроводу визначеної довжини до і пі- сля звужуючого пристрою. На цих ділянках не повинні встановлюватися ніякі пристрої, що можуть спотворити гідродинаміку потоку на вході або виході звужуючого пристрою. Довжина цих ділянок повинна бути такою, щоб перекручування потоку, внесені колінами, вентилями, трійниками то- що, змогли згладитися до підходу потоку до звужуючого пристрою. При цьому необхідно мати на увазі, що більш істотне значення мають перекру- чування потоку перед звужуючим пристроєм і значно менше - за ним, тому засувки і вентилі, що особливо регулюючі, рекомендується встановлювати після звужуючих пристроїв. Довжина L прямої ділянки перед звужуючим пристроєм залежить від відносної площі m звужуючого пристрою, діамет- ра трубопроводу D і виду місцевого опору, розташованого до прямої діля- нки. У таблиці вказані відносні довжини L/D в залежності від *т* для деяких різновидів місцевих опорів.

Довжина прямої ділянки L2 після звужуючого пристрою залежить тільки від числа m. Для m=0,05 L2=4D2 і для m=64 L2 = 8,2D2.

Дифманометр підключається до звужуючого пристрою двома лінія- ми (імпульсними трубками) внутрішнім діаметром не менше як 8 мм. До- пускається довжина ліній до 50 м, однак через можливість виникнення ве- ликої динамічної похибки не рекомендується використовувати лінії дов- жиною більше 15 м.

Таблиця 5.1 – Довжина прямої ділянки від відносної площі звужуючого пристрою

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| Місцевий опір | *m* | | | |
| 0,05 | 0,3 | 0,5 | 0,64 |
| Коліно або трійник | 10 | 16 | 28 | 46 |
| Група колін в одній площині | 14 | 22 | 36 | 50 |
| Група колін у різних площинах | 34 | 44 | 62 | 80 |
| Цілком відкриті засувки | 12 | 14 | 20 | 30 |
| Конусні звуження | 10 | 10 | 14 | 30 |
| Конусні розширення | 16 | 20 | 30 | 54 |
| Гільза термометра діаметром d0,03D | 5 | 5 | 5 | 5 |

Для правильного вимірювання витрати перепад тиску на вході диф- манометра повинний бути рівним перепадові тиску, що розвивається зву- жуючим пристроєм, тобто перепад від звужуючого пристрою до дифмано- метра повинний передаватися без перекручування. Це можливо в тому ви- падку, якщо тиск, створюваний стовпом середовища в обох сполучних трубках, буде однаковим. У реальних умовах ця рівність може порушува-

тися. Наприклад, при вимірі витрати газу причиною цього може бути ску- пчення конденсату в неоднаковій кількості в сполучних лініях, а при вимі- рі витрати рідини, навпаки, скупчування газових пухирців, що виділяють- ся. Щоб уникнути цього, сполучні лінії повинні бути або вертикальними, або похилими з ухилом не менш 1:10, причому на кінцях похилих ділянок повинні бути конденсато- або газозбірники (gas collections). Крім того, обидві імпульсні трубки повинні розташовуватися поруч, щоб уникнути неоднакового нагрівання або охолодження їх, що може призвести до неод- накової щільності рідини, що заповнює їх і, отже, до додаткової похибки. При вимірі витрати пари важливо забезпечити рівність і сталість рівнів конденсату в обох імпульсних трубках, що досягається застосуванням зрі- вняльних посудин.

До одного звужуючого пристрою може бути підключено кілька диф- манометрів. При цьому допускається підключення сполучних ліній одного дифманометра до сполучних ліній іншого.

При вимірюванні витрати рідини дифманометр рекомендується встановлювати нижче звужуючого пристрою 1, що виключає попадання в сполучні лінії і дифманометр газу, що може виділитися з протікаючої рі- дини, (рис. 5.3, а). Для горизонтальних і похилих трубопроводів сполучні лінії повинні підключатися через запірні вентилі 2 до нижньої половини труби (але не в самій нижній частині) щоб уникнути попадання в лінії газу або опадів із трубопроводу. Якщо дифманометр все-таки установлюється вище звужуючого пристрою (рис. 5.3, б), то в найвищих точках сполучних ліній необхідно встановлювати газозбірники 4 із продувними вентилями. Якщо сполучна лінія складається з окремих ділянок (наприклад, при обхо- ді якої-небудь перешкоди), то газозбірники встановлюються в найвищій точці кожної ділянки. При установці дифманометра вище звужуючого пристрою трубки поблизу останнього прокладаються з U-подібним виги- ном, що опускається нижче трубопроводу не менш ніж на 0,7 м для змен- шення можливості попадання газу з труби в сполучні лінії. Для вимірю- вання витрати гарячих рідин (t > 100°С) можлива додаткова похибка вимі- рювань через зміну середньої температури рідини в «плюсовій» сполучній лінії, що приводить до зміни тиску в «плюсовій» камері дифманометра.

При вимірюванні витрати газу дифманометр рекомендується устано- влювати вище звужуючого пристрою 1, щоб конденсат, що утворився в сполучних лініях, міг стікати в трубопровід (рис. 5.4, а). Сполучні лінії по- трібно підключати через запірні вентилі 2 до верхньої половини звужую- чого пристрою, їхню прокладку бажано робити вертикально. Якщо верти- кальна прокладка сполучних ліній неможлива, то їх варто прокладати з на-

хилом убік трубопроводу або конденсатозбірників (condensate collection). Для вимірювання витрати агресивного газу в сполучні лінії повинні вклю- чатися розділові судини. Продувка сполучних ліній здійснюється через ве- нтилі 3, 4, 6.

б)



1

2

5

3

а)

ДМ



4

3

1

2

ДМ

0,

Рисунок 5.3 – Схема сполучних ліній для вимірювання витрат рідини а) дифманометр нижче звужую чого пристрою;

б) дифманометр нижче звужую чого пристрою;

Для вимірювань витрати перегрітої водяної пари неізольовані сполу- чні лінії виявляються заповненими конденсатом. Щоб уникнути додатко- вої похибки рівень конденсату і його температура в обох лініях повинні бути однаковими при будь-якій витраті.



3

2

1

а)

ДМ



2

6

1

4

б)

5

ДМ

Рисунок 5.4 – Схема сполучних ліній при вимірюваннях витрати газу з установкою дифманометра вище (а) і нижче (б) звужуючого пристрою

* + 1. Рівняння витрат для стисливої рідини.

У випадку виміру витрат стисливої рідини (газу або пари) необхідно враховувати зміну густини речовини у зв'язку зі зміною тиску при проті-

канні через звужуючий пристрій. При цьому з достатнім ступенем точності можна вважати, що зміна стану газу або пари описується рівнянням адіа- батного процесу, тобто

де k-показник адіабати; С - постійна величина.

P  C k , (5.1)

Масові та об’ємні витрати газу:

GM  F0

2P,

(5.2)

V  F 2 P.

(5.3)

M 0 

де ε - поправочний множник на розширення вимірюваного середовища.

* 1. Вимірювання швидкостей і витрати напірними трубками

Напірні трубки застосовують для вимірювання швидкості й тиску в потоках, а також для вимірювання швидкостей у пограничних шарах при експериментальних дослідженнях як у лабораторних, так і у виробничих умовах. Вони використовуються також для вимірювання витрат рідин і га- зів при дослідженнях, випробуваннях і в ряді інших випадків. Спеціальні напірні трубки застосовують, крім того, для вимірювання швидкості польоту літаючих апаратів (точніше, швидкості щодо повітряного середо- вища).

Вимірювання швидкості в потоці рідини або газу напірними трубка- ми зводиться до вимірювання динамічного тиску (швидкісного напору), що дорівнює різниці повного й статичного тисків і пов'язане зі швидкістю співвідношенням, що одержане з рівняння Бернуллі

2

pn  pc 

, (5.4)

2

звідки швидкість незбуреного потоку в точці вимірювання дорівнює

  p

2



n  pc 

, (5.5)

де  – швидкість руху газу або рідини, м/с;

ρ – густина рідини або газу в робочих умовах, кг/м3;

р*п* – повний тиск у лобовій частині (frontal part) напірної трубки, що має назву критичної, Па;

рс – статичний тиск або так званий гідродинамічний тиск у незбуреному потоці, Па.

Таким чином, для визначення динамічного тиску рv2/2, а отже, і швидкості в даній точці потоку необхідно виміряти різницю повного й ста- тичного тисків. Вимірювання повного тиску може бути здійснене напір- ною трубкою (рис.5.5) з отвором на лобовому її кінці (трубкою Піто- Прандтля). Різниця тиску вимірюється мікроманометром або рідинним ди- фманометром.



Рисунок 5.5 – Вимірювання витрати за допомогою трубки Піто-Прандтля

Необхідно мати на увазі, що якою би вдалою не була конструкція трубки, динамічний тиск вимірюється не цілком точно. Тому вводять поп- равочний коефіцієнт. Якщо позначити цей коефіцієнт через ξ, то

2



  

pn  pc

. (5.6)

* 1. Витратоміри постійного перепаду тиску

Витратоміри постійного перепаду тиски відносяться до засобів вимі- рювань, що мають назву витратомірів обтікання. Вони засновані на вимі- рюванні вертикального переміщення чутливого елемента (тіла), що зале- жить від витрат середовища й приводить одночасно до зміни площі прохі- дного отвору витратоміра таким чином, що різниця тисків на чутливий елемент (перепад тиску) залишається практично постійної. Протидіючою силою у витратомірах цього виду є сила ваги чутливого елемента, викону- ваного у вигляді поплавця або поршня.

До приладів постійного перепаду тиску відносяться ротаметри (рис.

5.6) , поршневі й поплавкові витратоміри.

Ротаметри, широко застосовуються в лабораторних і промислових умовах, призначені для вимірювання об'ємної витрати, що змінюється пла- вно, однорідних потоків чистих і слабко забруднених рідин і газів з диспе- рсними включеннями сторонніх часток. Вони застосовуються також як ін-

дикатори витрати середовища в газоаналізаторах і інших приладах.

B 2



B

А

А

1

Рисунок 5.6 – Ротаметр

Принцип дії ротаметра будується на зрівноважуванні при будь-якій витраті сили ваги поплавця силами, що діють на нього з боку рідини.. Ро- таметр у найпростішому виді складається з вертикальної конусної скляної трубки 1, усередині якої перебуває чутливий елемент 2, виконаний у ви- гляді поплавця. Для забезпечення сталої роботи поплавця верхній його обід має канали із крутим нахилом. Під дією потоку рідини або газу поп- лавець вертикально переміщується й одночасно приходить в обертовий рух і центрується в середині потоку. По переміщенню поплавця ротаметра уздовж його шкали, нанесеної на конусній скляній трубці судять про об'є- мні витрати в одиницю часу (л/год, м3/год). Є ротаметри, у яких поплавець не робить обертового руху, а корпус їх виконаний з металу.

Положення поплавця залежить не тільки від витрати, але і від густи- ни контрольованого середовища, тобто градуювання ротаметра повинне проводитися з її врахуванням. Через велику чисельність контрольованих середовищ ротаметри підрозділяються на дві групи: для рідин, що граду- юються на воді, і для газів, що градуюються на повітрі.

Якщо такі ротаметри використовуються для вимірювання витрати інших середовищ, то їхні показання потрібно множити на поправочний множник

k*.* Якщо в'язкості вимірюваного і градуювального середовищ близькі, то

k  , (5.7)

gr (n  )

(n  gr )

де gr і  градуювальна і дійсна густини середовища.

Переградуювання ротаметра може бути здійснене зміною п, напри-

клад шляхом виготовлення поплавця з іншого матеріалу або пустотілим.

В ротаметрах використовуються скляні конічні трубки, на зовнішній поверхні яких нанесена шкала. Покажчиком служить верхня горизонтальна площина поплавця. Ротаметри зі скляною конусною трубкою застосову- ються для вимірювання витрати газів або прозорих рідин, що знаходяться під тиском не більш 0,6 МПа.

Для вимірювання витрати середовищ під надлишковим тиском до 6,4 МПа використовуються ротаметри з металевою конічною трубкою. Зви- чайно такі ротаметри забезпечуються диференційно-трансформаторними або пневматичними перетворювачами для дистанційної передачі показів. Клас таких ротаметрів дорівнює 2,5.

Матеріал поплавців: сталь, алюміній, бронза, ебоніт, пластмаси - не повинний піддаватися корозії в середовищі. Ротаметри мають ряд переваг: простота будови, можливість вимірювання малих витрат і на трубопрово- дах, малих діаметрів; практично рівномірна шкала.

Недоліками ротаметрів є: необхідність установки тільки на вертика- льних ділянках трубопроводів, труднощі дистанційної передачі показів і запису; непридатність для вимірювання витрати середовищ з високими ти- ском і температурою.

* 1. Тахометричні витратоміри, лічильники кількості та електромаг- нітні витратоміри

Тахометричними називаються витратоміри, у яких швидкість руху робочого тіла пропорційна об'ємній витраті вимірюваного середовища. У більшості випадків робоче тіло - перетворювач витрати (турбінка, кулька тощо) - під впливом потоку обертається. У залежності від будови тахомет- ричні витратоміри підрозділяються на турбінні, кулькові і камерні.

Турбінкові (turbine) витратоміри (рис.5.7) є найбільш точними при- ладами для вимірювання витрат рідин.

Тахометричні перетворювачі витрати можуть використовуватися як у лічильниках кількості, так і у витратомірах. У першому випадку перетво- рювач витрати (наприклад, турбінка) зв'язаний з рахунковим механізмом. Тахометричні витратоміри мають електричні тахометричні перетворювачі частоти обертання чуттєвого елемента в електричний сигнал, вимірюва- ний потім показуючим приладом. Такі електричні перетворювачі швидкос- ті незначно гальмують рухливий елемент (у порівнянні з механічною пере- дачею в лічильниках), внаслідок чого точність тахометричних витратомірів вище точності лічильників з механічним редуктором. Тахометричні прила-

ди вимірюють об'ємні витрати. За необхідності вимірювання масових ви- трат вони повинні забезпечуватися густиномірами й обчислювальним при- строєм.

Лічильники кількості рідин застосовують для вимірювання сумарної кількості різних рідин: (води, нафти, мазуту, бензину тощо), що перебува- ють під тиском до 1-1,6 МПа. За принципом дії тахометричні лічильники розділяються на швидкісні й об'ємні. Ці технічні засоби залежно від того, для вимірювання якої рідини вони призначені, прийнято називати водолі- чильниками, нафтолічильниками, бензолічильниками тощо.

Похибка вимірювань і втрати статичного тиску на витратомірі зале- жать від витрати і в'язкості рідини. Тому важливими технічними даними таких приладів є мінімальна вимірювана витрата (нижня межа вимірю- вання) і втрата тиску на них.



а) б)

Рисунок 5.7 – Будова турбінкових перетворювачів витрати а) з аксіальною турбінкою; б) з тангенціальною турбінкою

Для здійснення процесу вимірювання турбінковий витратомір (рис.5.8) повинен складатися, принаймні, із трьох елементів:

а) турбінкового первинного перетворювача 3; б) вторинного перетворювача 4;

в) відлікової системи (реєстратора) 1.



4

1

2

3

2

Рисунок 5.8 – Принципова схема турбінного витратоміра

Турбінкові витратоміри застосовуються для вимірювання витрати рі-

зних рідин за винятком дуже вязких і забруднених. Для них важливою є змащуюча здатність вимірюваного середовища, тому найбільш доцільним є їхнє використання на нафтопродуктах. Для вимірювання витрати газу ту- рбінні витратоміри застосовуються рідко. Це зв'язано з тим, що через малу щільність газу досить великий обертаючий момент буває тільки при вели- ких витратах. Це зменшує діапазон вимірювання витратоміра і підвищує поріг чутливості. Крім того, у газовому середовищі прискорюється знос підшипників.

На рис. 5.8 схематично показана будова турбінного перетворювача витрати рідини. Корпус перетворювача є відрізком труби з двома фланця- ми для приєднання його до трубопроводу. Всередині корпуса встановлені потокоспрямлячі 2*,* з'єднані нерухомою віссю, на якій розташована турбін- ка 3. У витратомірах частота обертання турбінки пропорційна об'ємній ви- траті і за допомогою тахометричного перетворювача 4 перетвориться в ча- стоту вихідної напруги і потім за допомогою спеціальної схеми 1 - в анало- говий вихідний сигнал. У лічильниках кількості частота обертання турбін- ки. пропорційна кількості речовини яка проходить через переріз, виміря- ється рахунковим механізмом, з'єднаним з віссю турбінки шестерним ре- дуктором і магнітною муфтою.

Турбінки тахометричних витратомірів підрозділяються на аксіальні і тангенціальні. У перших вісь збігається з напрямком потоку, у других вона перпендикулярна потокові.

Аксіальні турбінки мають лопаті гвинтової форми (на рис. 5.7, а по- казана чотирьохлопаткова турбінка). При малому діаметрі турбінок число лопат мале (4 - 6), але вони мають велику довжину. При великих діаметрах турбінки число лопат велике (до 20), але їхня висота і довжина невеликі (в порівнянні з діаметром).

Конструкції тангенціальних турбінок різноманітні. Як приклад на рис. 5.7, б показана турбінка серійних одноструминних водолічильників.

Для незначних навантажень на турбінку її частота обертання  про- порційна об'ємній витраті Q0, однак на характер цієї залежності впливають в'язкість V і щільність  вимірюваного середовища, момент опору Мс від тертя в опорах і реакції тахометричного перетворювача частоти обертання (поз. 1 на рис. 5.8 або механічного лічильника, конструктивні параметри турбінки.

Прикладом турбінного тахометричного витратоміра, використання якого можливо на ТЕС, є витратомір топкового мазуту ТМ-1. Ці витрато- міри мають диференційно-трансформаторний тахометричний перетворю- вач, сигнал від якого надходить до нормувального перетворювача, з вихід-

ним сигналом 0-5 мА. Перетворювачі витрати таких витратомірів виготов- ляються з діаметрами умовних проходів від 32 до 200 мм для тиску до 6,4 МПа і температури від 50 до 150°С. Витратоміри можуть мати шкали з верхніми межами 6,3–240 м3/год. Діапазон вимірювання цих витратомірів (0,21) Gвп. У діапазоні (0,3-1) Gвп гранична основна похибка дорівнює ±2

% і в діапазоні (0,2–0,3) Gвп ±2,5 %. Слід зазначити, що в даний час турбін-

ні тахометричні витратоміри є одними з найбільш точних. Існують витра- томіри, що серійно випускаються, з основною похибкою 0,5 %. Ця похибка може бути зменшена індивідуальним градуюванням.

Перевагою турбінних витратомірів є можливість вимірювання витрат у широкому діапазоні (510-9  2 м3/с) на трубопроводах діаметром 4-750 мм з тисками до 250 МПа і температурах від - 240 до +700°С, а також ве- ликий діапазон вимірювання. При великих швидкостях і діаметрах труб ді- апазон вимірювання Gвп/Gхв досягає 15-20, при малих швидкостях і малих діаметрах труб 5-10. Крім того, такі витратоміри мають малу інерційність.

Однак тахометричні турбінні витратоміри мають і недоліки, обме- жуючі їхнє застосування: вплив в'язкості контрольованого середовища, знос опор (не можна, наприклад, вимірювати витрату середовищ, що міс- тять зважені частки, особливо якщо вони мають абразивні властивості).

Кульковими називаються тахометричні витратоміри, рухливим еле- ментом яких є кулька, що безупинно рухається в одній площині по внут- рішній поверхні труби під впливом попередньо закрученого потоку. Шви- дкість руху кульки по колу труби пропорційна об'ємній витраті рідини. Схема кулькового перетворювача для середніх і великих витрат представ- лена на рис. 5.9, а. Потік рідини, закручений формувальником 1 у гвинто- вому напрямку, викликає рух кульки 2 по колу. Від переміщення уздовж труби кулька утримується обмежувальним кільцем 3 за яким розташову- ється потоковипрямляч (stream rectifier) 4 для випрямлення закрученого потоку. На зовнішній стороні немагнітного корпуса розташовується та- хометричний перетворювач 5 для перетворення частоти обертання кульки в частотний електричний сигнал.

Для невеликих витрат застосовується конструкція, представлена на рис. 5.9, б. Тут немає спеціального формувальника для закручування пото- ку, а рух кульки по колу викликається тангенціальним підведенням рідини. У кулькових витратомірах застосовуються тахометричні перетворю-

вачі швидкості, аналогічні перетворювачам турбінних витратомірів. Куль- ка (рис. 5.9, а) під дією відцентрової сили притискається до внутрішньої поверхні труби, а під дією осьової складової швидкості потоку - до обме- жувального кільця, тобто кульці крім сил вязкого тертя рідини необхідно

переборювати сили тертя про поверхні труби й обмежувального кільця. Це викликає відставання окружної швидкості кульки VК від окружної швидко- сті потоку V, що оцінюється коефіцієнтом ковзання S= (V- VК )/ V, звідки

V к= V (1 - S).

а) б)



5

1 2 3 4

Рисунок 5.9 - Кулькові перетворювачі витрати а) для великих витрат; б) для малих витрат

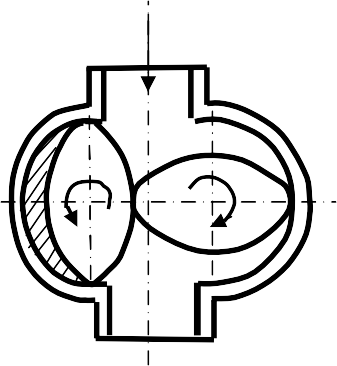
Частота f імпульсів тахометричного перетворювача зв'язана зі швид- кістю кульки співвідношенням f = VK/(2R), де R*-*радіус обертання центра кульки. Для забезпечення однозначної залежності між f і об'ємною витра- тою V0 треба мати сталу S. Цей коефіцієнт найменше змінюється в облас- ті значень чисел Рейнольдса від 103 до 105, тому кулькові витратоміри про- ектуються для роботи в цьому діапазоні. Крім того, для зменшення ковзан- ня маса кульки робиться по можливості малою. Відповідно до стандарту кулькові витратоміри можуть застосовуватися для вимірювання витрати рідин із щільністю 700—1400 кг/м3, в'язкістю (0,3-12)10-6 м2/с. Через від- сутність опор у рухливого елемента витратоміри можуть використовувати- ся на рідинах із твердими включеннями (обмеженої величини) і агресив- них. Діапазон вимірювання кулькових витратомірів звичайно дорівнює (0,2–1) Gвп. На АЕС використовуються кулькові витратоміри ШТОРМ двох модифікацій; ШТОРМ-32М (верхня межа вимірювання 50 м3/год) і ШТОРМ-8А (верхня межа вимірювання 8 м3/год). Основна їх похибка

±(1,52,5) %.

* 1. Об’ємні витратоміри

Камерними (об’ємними) називаються тахометричні витратоміри і лі- чильники, що мають один або кілька рухливих елементів, що при русі від- мірюють визначені обєми рідини (рис.5.10). Звичайно ці рухливі елементи

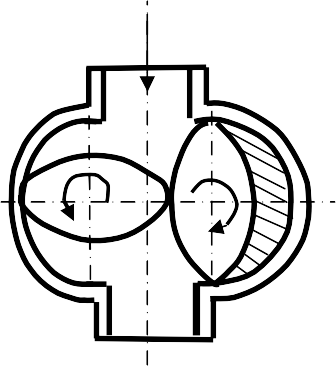
рухаються безупинно зі швидкістю, пропорційною об'ємній витраті. У промисловості в переважній більшості випадків застосовуються камерні лічильники. Перевагами їх є висока точність вимірювання (0,5 - 1 % для рідин і 1 - 1,5 % (для газів), досить великий діапазон вимірювань, слабкий вплив в'язкості вимірюваного середовища. Остання обставина дозволяє встановлювати камерні лічильники для рідин з вязкістю до 310-4 м2/с.



Р1

Р2

а)



Р1

Р2

б)

Рисунок 5.10 – Схема лічильника з овальними шестернями

Об'ємні тахометричні лічильники, що мають більш високу точність в порівнянні зі швидкісними, застосовують для вимірювання сумарної кіль- кості мазуту, нафти, бензину й інших рідин. В об'ємних лічильниках ріди- на, що протікає через нього, вимірюється окремими, рівними за об'ємом дозами, що відтинаються одним або декількома робочими елементами. Чи- сло пропущених доз рідини підсумується рахунковим механізмом, а сума- рна кількість рідини, що пройшла через прилад за певний проміжок часу, показується рахунковим покажчиком.

* 1. Електромагнітні витратоміри

Електромагнітні (індукційні) витратоміри застосовують для вимірю- вання в трубопроводах об'ємних витрат електропровідних рідин, розчинів і пульпи з дрібнодисперсними не феромагнітними частками. Питома елект- рична провідність вимірюваного середовища повинна перебувати в межах від 10-8 до 10 Ом/м. Деякі різновиди електромагнітних витратомірів знахо- дять застосування для вимірювання витрат рідкого металевого теплоносія, наприклад натрію.

Принцип дії розглянутих витратомірів (рис. 5.11, 5.12) ґрунтується на законі електромагнітної індукції, відповідно до якого наведена в прові- днику е.р.с. пропорційна швидкості його руху в магнітному полі. Роль провідника, що рухається в магнітному полі, грає електропровідна рідина,

що протікає через первинний електромагнітний перетворювач витрат, встановлений у трубопроводі. Вимірюючи е.р.с, наведену в електропровід- ній рідині, що при своєму русі перетинає магнітне поле первинного перет- ворювача, можна визначити первинну швидкість рідини, а разом з нею й об'ємні витрати.



1

2

3

Е

vcр

В

ПЕПР

ІП

ВП

Рисунок 5.11 – Електромагнітний витратомір

Na А 1 2 3 4



N

Na 3

2

1

3

А

Б ВП

А



а) N S

S

б)

А-А

Рисунок 5.12 – Схеми електромагнітних витратомірів а) із зовнішнім магнітом; б) з внутрішнім магнітом

На рис 5.12 показані схеми електромагнітних витратомірів. Корпус 1 перетворювача, виготовлений з немагнітного матеріалу і покритий зсере- дини електричною ізоляцією 2 (гумою, емаллю, фторопластом тощо), роз- ташований між полюсами магніту (на рис.5.12, а зображений постійний магніт). Через стінку труби, ізольовано від неї, по діаметру введені елект- роди 3, що знаходяться в електричному контакті з рідиною. Силові лінії магнітного поля спрямовані перпендикулярно площині, що проходить че- рез вісь труби і лінію електродів.

Застосування постійних магнітів у витратомірах дозволяє полегшити боротьбу з перешкодами від зовнішніх електромагнітних полів, збільшити швидкодію приладу. Основним недоліком їхнього використання є поляри- зація електродів: концентрація біля позитивного електрода негативних іо- нів, а біля негативного позитивних. Внаслідок цього на границях електро- дів створюються е.р.с., що у сумі утворюють е.р.с. поляризації, спрямовану проти основний вимірюваної е.р.с., а це змінює градуювальну характерис- тику приладу й унеможливлює його стабільну роботу. Тому електромагні- тні витратоміри з постійним магнітним полем не застосовуються для рідин з іонною провідністю. Широке поширення вони одержали для вимірюван- ня витрати розплавлених металів, у яких відсутнє явище поляризації. Ти- пова область застосування таких витратомірів - ядерні енергетичні устано- вки з рідкометалевим теплоносієм. У цих установках звичайно використо- вуються малогабаритні електромагнітні перетворювачі, що є власне кажу- чи вимірниками локальної швидкості рідкого металу.

Електромагнітні витратоміри можуть бути використані в ряді випа- дків, коли застосування витратомірів інших типів утруднене або неможли- во зовсім: при вимірі витрати агресивних, абразивних, вязких рідин і пульпи, вимірі витрати рідких металів.

До числа недоліків електромагнітних витратомірів варто віднести вимоги до мінімального значення електропровідності вимірюваного сере- довища, що звужує коло використання таких витратомірів. Іншим недолі- ком витратомірів є складність вимірювальної схеми, на яку впливає багато факторів, що утрудняє виготовлення витратомірів класу більше 1 і усклад- нює експлуатацію.

* 1. Ультразвукові витратоміри

Принципова схема ультразвукового витратоміра наведена на рис.5.13. Звукові коливання високої частоти (20 кГц і вище), створювані електроакустичним вібратором (випромінювачем) В1, проходять через се-

редовище, що рухається трубопроводом, й реєструються приймачем П1, що відстоїть від випромінювача на відстані 𝑙 . Якщо v - швидкість потоку середовища, а с - швидкість звуку в даному середовищі, то тривалість по-

ширення звукової хвилі за напрямком руху потоку від випромінювача В1 до приймача П1.

v 88

В1(П2) В2(П1)

Рисунок 5.13 – Схема ультразвукового витратоміра

Тривалість поширення звукової хвилі проти руху потоку від випромінювача В2 до приймача П2

2 

L

c  

. (5.8)

Різниця часу, що вимірюється електронно-рахунковою схемою

  2L  1 .

1  2

c2

c2

Взявши до уваги, що відношенням 2

c2

(5.9)

можна знехтувати порівня-

но з одиницею, і виразивши швидкість потоку через витрати, одержимо рі- вняння для вимірювань ультразвуковими витратомірами

  2  L G , (5.10)

F  c2

де F – площа перерізу потоку;

φ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкостей за перерізом потоку. Існують різні способи й різні вимірювальні схеми для визначення :

1. вимірювання різниці фазових зсувів ультразвукових хвиль, що на- правляються за потоком й проти нього;
2. вимірювання різниці частот повторення коротких імпульсів або паке- тів ультразвукових коливань, що спрямовують одночасно за потоком й проти нього;
3. вимірювання різниці тривалості проходження коротких імпульсів, що направляються одночасно за потоком й проти нього.

Крім того, є самостійний метод визначення витрат, що базується на вимірюванні зміщення потоком ультразвукової хвилі, яка направляється перпендикулярно до напрямку руху середовища.

* 1. Оптичні (лазерні) витратоміри

До числа порівняно нових методів вимірювання локальних швидкос- тей потоку й витрат відносяться методи, засновані на застосуванні оптич- них квантових генераторів-лазерів (ОКГ). Перевагами цих методів є: без- контактність, висока чутливість, мала інерційність, великий діапазон вимі- рювання швидкостей і витрат незалежно від фізичних властивостей вимі- рюваного середовища (як рідин, так і газів), за винятком вимоги її прозо- рості в діапазоні довжин хвиль, випромінюваних лазерами.

Крім того, лазерні витратоміри використовують при вимірюванні ви- трат агресивних, високо- і низькотемпературних (кріогенних) рідин і газів.

Поширення одержали два конструктивні різновиди оптичних (лазер- них) витратомірів, що відрізняються лежачими в їхній основі фізичними явищами: витратоміри, засновані на ефекті розсіювання світла частками, що рухаються (допплерівські витратоміри), і витратоміри, засновані на ефекті Фізо-Френеля - захоплення світла середовищем, що рухається.

В оптичному витратомірі, що реалізує перший ефект, випроміню- вання лазера, розсіяне природними або штучно уведеними частками, що рухаються в потоці, здобуває частотний зсув, пропорційний осередненої швидкості часток.

У витратомірі, що реалізує ефект Фізо-Френеля, лазер генерує дві зу- стрічні хвилі, що біжать по замкнутих оптичних шляхах. Потік рідини або газу, що рухається на деякій ділянці резонатора по трубопроводу із прозо- рими вікнами, створює різні за знаком збільшення оптичних шляхів зу- стрічних хвиль лазера за рахунок складової проекції вектора швидкості по- току на напрямок променя. Внаслідок цього різні й частоти зустрічних хвиль.

* 1. Вимірювання витрат методом контрольних „міток"

Якщо створити в потоці вимірюваного середовища яку-небудь „міт- ку" (яка-небудь ознака частини потоку, за переміщенням якого можна про- стежити) і вимірювати час tM, за який „мітка" пройде певний фіксований шлях LM, то можна визначити швидкість середовища, а відтак, і витрату (рис. 5.14).

Вважаючи, що швидкість переміщення „мітки" v дорівнює швидкос- ті потоку, одержимо

v  LM . (5.11)

tM



LM

Рисунок 5.14 – Метод контрольних міток

Витратоміри, робота яких основана на цьому методі вимірювань, складаються із пристрою, що періодично створює ту або іншу „мітку" по- току; пристрою, що фіксує момент проходження „мітки", і приладу, що вимірює тривалість переміщення „мітки" на фіксовану відстань LM.

Рівняння вимірювання буде мати вигляд

t   LM F,

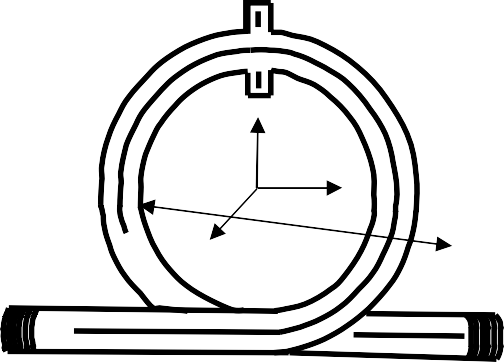
M Q

(5.12)

де φ – коефіцієнт, що залежить від розподілу швидкостей за перерізом по- току і числа Рейнольдса.

* 1. Відцентрові витратоміри

Відцентровий витратомір являє собою 360-градусне коліно (тобто повне коло) трубопроводу, у верхній частині якого на зовнішній і внутрішній (за радіусом кривизни) стінках відбирають тиски р1 і p2 відповідно (рис.5.15).



р1

y

р2

z

x

R0=D0/2

Рисунок 5.15 – Відцентровий витратомір

Принцип дії відцентрових витратомірів базується на тому, що за руху середовища криволінійною ділянкою трубопроводу з'являються відцентрові си- ли, що створюють перепад тисків між точками з різними радіусами кривизни (де кривизна більше, там і відцентрова сила більше й більше тиск на стінку).

Отримані з умови рівності гідростатичної й відцентрової сил, що ді- ють на елемент об'єму середовища, що тече по криволінійній ділянці тру- бопроводу (з радіусом кривизни його геометричної осі R0) робочі рівняння

вимірювання відцентрових витратомірів мають вигляд: для краплинних рідин

G   r

R r

0

p2  p1 ,

2



(5.13)

для газів

G   r

R r

0

2 p

p0 ln p2 ,

1



(5.14)

де r – внутрішній радіус трубопроводу: р0 = 1/2 (р1 + р2);

ψ – корегувальний коефіцієнт, що залежить від в'язкості вимірюваного се- редовища й шорсткості трубопроводу;

ζ – коефіцієнт, що характеризує ступінь ізотермічності процесу стиску газу.

При р2/р1 < 2 гази з достатньою для практики точністю можна вважати краплинними рідинами.

* 1. Вихрові витратоміри

Принцип дії цих витратомірів полягає в створенні (за допомогою гвинтоподібних шнеків) у потоці середовища, що рухається по трубопро- воду, стійкого периферійного вихору. Центральна частина потоку (поблизу вісі трубопроводу) при цьому здобуває характер гвинтового шнура. Якщо сформований у такий спосіб потік пустити через розширюючу насадку, то периферійні вихороутворення (formation of vortex) втрачають стійкість, а центральний шнур починає прецесувати (коливатися) відносно геометрич- ної вісі насадки із частотою, пропорційною середньої швидкості потоку, і амплітудою, рівною діаметру вихідної частини насадки. З аналогічною ча- стотою й амплітудою, рівною швидкісному напору ρv2, буде змінюватися при цьому й тиск на виході потоку з насадка. Перетворивши за допомогою амплітудно-частотного датчика пульсації тиску в електричний сигнал і по- діливши його амплітудне значення на частотне, одержимо величину, зна- чення якої пропорційне масовим витратам речовини. Для знаходження об'ємних витрат достатньо виміряти частотну характеристику сигналу.

* 1. Гідродинамічні витратоміри

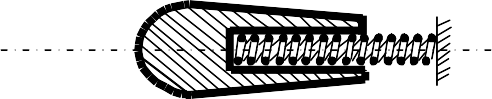
Гідродинамічні витратоміри базуються на вимірюванні гідродинамі- чного опору в потоці (рис.5.16).

92



v

a)



в)

Рисунок 5.16 – Гідродинамічні витратоміри

* 1. Калориметричні й термоанемометричні витратоміри.

Якщо знехтувати теплом, що віддається потоком через стінки трубо- проводу в навколишнє середовище, то рівняння теплового балансу між ви- тратами тепла нагрівачем, і теплом, переданим потоку, приймає вигляд

qt  k0McpT,

(5.15)

де k0 – поправковий множник на нерівномірність розподілу температур за перетином трубопроводу;

ср – теплоємність (для газу за постійного тиску) за температури Т1 + Т2/2; Т1 і Т2 – температури потоку до й після нагрівача; ΔТ=Т2 - Т1.

Теплоту до потоку в калориметричних витратомірах підводять за- звичай електронагрівниками, для яких

де І – сила струму; R – опір нагрівача.

t

q  0, 24I2R,

(5.16)

Рівняння вимірювання (статична характеристика перетворення) ка- лориметричних витратомірів

M  0, 24IR . (5.17)

k0cpT

Існують два способи вимірювання масових витрат відповідно до отриманого виразу:

* витрати визначають за значенням потужності, споживаної нагрівачем, яка забезпечує постійну різницю температур ΔТ;
* витрати визначають за різницею температур ΔТ при незмінній потуж- ності, що підводиться до нагрівача.

# 6 ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ РІДИН ТА СИПКИХ ТІЛ

Під вимірюванням рівня розуміється індикація положення розділу двох середовищ різної густини щодо якої-небудь горизонтальної площини, прийнятої за початок відліку.

Вимірювання рівнів рідин і сипких тіл відіграє важливу роль для ав- томатизації технологічних процесів, особливо якщо підтримання рівня повязане з умовами безпечної роботи устаткування. Рівнеміри можуть ви- користовуватися або для контролю за відхиленням рівня від номінального й у цьому випадку вони мають двосторонню шкалу, або для визначення кількості рідини (у сполученні з відомими розмірами ємності) і в цьому випадку вони мають однобічну шкалу. У залежності від умов вимірюван- ня, характеру контрольованого середовища, використовуються різні мето- ди вимірювання рівня. Якщо немає необхідності в дистанційній передачі показань, рівень рідини можна вимірювати приладами з візуальним відлі- ком (вказівних стекол). При необхідності дистанційного вимірювання рів- ня використовуються більш складні прилади: гідростатичні (дифманомет- ричні і барботажні), буйкові і поплавкові, ємнісні, індуктивні, радіоізотоп- ні, хвильові, акустичні, термо-кондуктометричні.

Засоби вимірювань рівнів називаються рівнемірами. Як і всі метро- логічні засоби, рівнеміри складаються із сукупності вимірювальних перет- ворювачів і допоміжних пристроїв, необхідних для здійснення процесу вимірювання (пристроїв для лінеаризації функцій перетворення, відлікових пристроїв тощо).

Первинний перетворювач (датчик) сприймає вимірювану величину - рівень і перетворює її у вихідний сигнал (електричний, пневматичний, час- тотний), що надходить на наступні перетворювачі, або в показання, відлі- чувані по шкалі рівнеміра.

Принцип дії первинних перетворювачів рівнемірів заснований на ро- зходженні фізичних властивостей речовин, що утворюють межу розділу.

Залежно від того, розходження яких фізичних властивостей речовин сприймає первинний перетворювач, рівнеміри підрозділяють на механічні, акустичні, електричні, оптичні й теплові.

* 1. Рівнеміри з візуальним відліком

Такі рівнеміри базуються на візуальному вимірі висоти рівня рідини. При невисоких тисках середовища висота рівня виміряється в скляній трубці (вказівному склі), що сполучена з рідинним і газовим просторами контрольованого резервуара (рис. 6.1). При підвищених тисках застосову-

ється плоске скло, на поверхні якого з боку рідини нанесені вертикальні грановані канавки. З умов міцності не рекомендується застосовувати вказі- вне скло довжиною більш 0,5м, тому при великому діапазоні зміни рівня встановлюється кілька стекол у шаховому порядку таким чином, щоб їхні діапазони вимірювання перекривалися.

h2

1



2

h2

Рисунок 6.1 – Схема рівнеміра з візуальним відліком

Основним джерелом додаткової погрішності таких рівнемірів є різ- ниця густин рідини в контрольованому резервуарі й у склі, викликана роз- ходженням температур (особливо якщо рідина в резервуарі знаходиться при високій температурі, а вказівне скло знаходиться на значному відда- ленні). Розходження густин призводить до розходження рівнів у резервуарі і вказівному склі (рівень у склі іноді називають «ваговим» рівнем);

Похибка може досягати істотних значень, тому з метою її зменшення необхідна або теплова ізоляція рівнеміра, або продувка його рідиною з ре- зервуара перед відліком.

* 1. Механічні рівнеміри

До цих рівнемірів відносяться поплавкові, буйкові й гідростатичні рівнеміри. Всі вони реалізують абсолютний метод вимірювання рівнів, що базується на використанні розходження густин речовин, які утворюють межу розділу.

Принципова схема поплавкового рівнеміра представлена на рисунку 6.2. Як первинний перетворювач рівнеміра використовується тіло (поп- лавець) кулястої або циліндричної форми, що плаває на поверхні рідини й має постійну осадку ( 𝑙 ). Поплавець під дією виштовхуючої сили (архіме- дової) переміщається разом з рівнем рідини. Положення поплавця, що є

мірою поточного значення рівня рідини, фіксується вторинним перетворю- вачем і перетворюється в електричний, пневматичний, частотний сигнал і

(або) відлічується по шкалі приладу, що показує. Зв'язок поплавця із вто- ринним перетворювачем може здійснюватися за допомогою механічних елементів (троса, стрічки, важеля) або за допомогою безконтактних (опти- чних, акустичних, радіоізотопних тощо) спостерігаючих систем.



Рисунок 6.2 – Схема поплавкового рівнеміра

Характерна риса поплавкових рівнемірів з механічним зв'язком - не- обхідність герметизації виводу для вимірювання рівнів токсичних, легко- випаровуваних рідин, у посудинах з надлишковим тиском, а також наяв- ність додаткових похибок, пов'язаних з пружною деформацією й тертям елементів зв'язку.

У той же час використання для фіксації положення поплавця безкон- тактних слідкуючих систем, ускладнює конструкцію рівнемірів, обумов- лює, як правило, нелінійність їхніх характеристик перетворення.

За ретельного градуювання й правильної експлуатації поплавкових витратомірів їхня основна похибка може бути зведена до значення порядку

±1 мм у діапазоні вимірювань до 15-20 м. Внаслідок цього поплавкові рів- неміри знаходять застосування в якості зразкових.

Найбільш істотний вплив на точність вимірювання рівнів поплавко- вими витратомірами надає зміна температури в робочій порожнині судини. Зміни температури обумовлюють температурну деформацію поплавця, зміна густин рідини й газу в надрідинній порожнині, що, в остаточному пі- дсумку, приводить до зміни осадки поплавця. Так, якщо температурні змі- ни густин рідини (ρр) і газу (ρг) складуть відповідно Δρр, Δρг, то абсолютна додаткова похибка рівнеміра, пов'язана зі зміною осадки поплавця

𝑙  p  ã  𝑙,

ð  ã

за умови сталості площі перерізу поплавця.

(6.1)

Принципова схема буйкового рівнеміра показана на рис. 6.3.



с

x

г

F

h

p

Рисунок 6.3 – Принципова схема буйкового рівнеміра

Чутливий елемент рівнеміра – буй (beacon) є масивним тілом (як пра- вило, осесиметричним), підвішеним вертикально всередині посудини, у якій вимірюється рівень рідини. За зміни Δh рівня рідини змінюється сту- пінь занурення буя, а отже, і діюча на нього виштовхувальна сила. Зміна виштовхувальної сили компенсується деформацією (Δх) пружного елемен- та (пружини, мембрани, торсійної трубки), що і є мірою зміни рівня рідини в посудині.

Деформація пружного елемента вторинним перетворювачем перетво- риться в пропорційний електричний, пневматичний або частотний сигнал.

Статична характеристика перетворення буйкових рівнемірів має вигляд

x 

1 

h

C

(p  г )gF

, (6.2)

де С – твердість пружного елемента;

g – прискорення вільного падіння, м2/с; F – площа поперечного перерізу буя, м2.

Основними факторами, що визначають точність вимірювання рівня буйковими рівнемірами, є:

* несталість твердості С, обумовлене властивостями пружного елемента;
* несталість площі F поперечного перерізу буя, що характеризує якість і технологію його виготовлення;
* зміни густин рідини й газу, обумовлені несталістю їхнього складу й те- мператури.

Слід зазначити, що температурний фактор впливає й на перші дві складові похибки вимірювання рівня. Основна погрішність буйкових рів- немірів коливається в межах ± (1-1,5) %.

Особливість буйкових рівнемірів – наявність початкового (неконт-

рольованого) рівня, від якого ведеться відлік показань. Розмір початкового рівня становить зазвичай 4-10 мм. Він необхідний для усунення впливу сил поверхневого натягу, що максимальні в момент торкання (або відриву) буя поверхні рідини. Із цією же метою використовують спеціальні покриття, що зменшують налипання рідини на поверхню буя.

Принцип дії гідростатичних рівнемірів (рис. 6.4) базується на вимірю- ванні тиску стовпа рідини, висота якого дорівнює висоті рівня рідини в по- судині.



М2

𝑙

ДМ

М1

р

г

Рисунок 6.4 – Гідростатичний рівнемір

h

Гідростатичний тиск при цьому вимірюється або за допомогою двох манометрів (M1, М2), або одним диференціальним манометром (ДМ).

У першому випадку (при вимірюванні різниці тисків Δр = p1 – р2 двома манометрами) характеристика перетворення рівнемірів описується рівнянням

h  p  L , gp  г 

1  p 

г

(6.3)

де L – різниця висот установки газового (М2) і рідинного (M1) манометрів. У другому випадку (при використанні ДМ) характеристика перет-

ворення має вигляд

h  p . g(p  г )

(6.4)

Гідростатичні рівнеміри з механічними сприймаючими елементами відрізняються простотою монтажу й обслуговування, високою надійністю. Однак їхній чутливий елемент перебуває в безпосередньому контакті з конт- рольованим середовищем, що вимагає в ряді випадків застосування для датчи- ків спеціальних матеріалів, істотно звужує область їхнього використання.

Від зазначеного недоліку вільний один з типів гідростатичних рівне-



К Ф Др

RM

M

98

Kп

мірів – п п'єзометричний*.*

l

Рисунок 6.5 – П’єзометричний гідростатичний рівнемір

Прилад працює в такий спосіб. Нейтральний відносно рідини газ при відкритому відсічному клапані К проходить через фільтр Ф, дроселюється до певного заданого тиску дроселем Дp і пропускається через імпульсну трубку, опущену в рідину, рівень якої вимірюється. Регулятор витрат RM забезпечує постійний рівень витрат газу q, що не залежить від поточного значення рівня h. Мірою h у цьому випадку є тиск, що реєструється мано- метром М.

П’єзометричні рівнеміри придатні для вимірювання рівня будь-яких, у тому числі, і агресивних рідин (при правильному виборі матеріалу імпуль- сної трубки). Єдиний фактор, що лімітує, - в'язкість рідини. Вплив в'язкос- ті проявляється в збільшенні діаметра пухирців газу, відривання яких від обріза трубки супроводжується виникненням коливань тиску й витрат у вимірювальній лінії, що різко знижує точність вимірювань. Тому п’єзометричні рівнеміри застосовують для вимірювання рівнів рідин, в'яз- кість яких не перевищує 2000 сСт (сантистоксів).

* 1. Дифманометричні рівнеміри

Схема підключення дифманометра до відкритого резервуара, що знаходиться під атмосферним тиском, зображена на рисунку 6.6.

Обидві імпульсні трубки дифманометра заповнюються контрольова- ною рідиною (якщо вона не агресивна).

0 0

9



9Н

1

Рисунок 6.6 – Схема підключення дифманометра для вимірювання рівня у відкритому резервуарі

* 1. Акустичні рівнеміри

Існують і знаходять застосування акустичні рівнеміри трьох основ- них типів - локаційні рівнеміри, рівнеміри поглинання й резонансні. Всі вони реалізують різні фізичні явища, пов'язані з поширенням звуку в пру- жному (рідинному або газовому) середовищі.

Так, локаційні рівнеміри реалізують ефект відбиття звукової хвилі від поверхні розділу середовищ (рис. 6.7).



Г

~~~~

П

h

Рисунок 6.7 – Акустичний рівнемір

Генератор Г випромінює в рідину пакет імпульсів високої (ультраз- вуковий) частоти. Відбитий від границі розділу рідина-газ сигнал уловлю- ється приймачем П ультразвукових коливань. Час t між моментом посилки зондувального імпульсу й моментом приходу відбитого від рівня імпульсу пов'язане з поточним значенням рівня залежністю

t  2h , c  sin 

(6.5)

де с – швидкість звуку в контрольованому середовищі, м/с.

100

Час t фіксується відповідною вимірювальною схемою й перетворю- ється у вихідний сигнал рівнеміра, пропорційний (при постійному й відо- мому значенні с) поточному значенню рівня h.

Локація рівня може провадитися знизу й зверху. У другому випадку за часом проходження ультразвукових коливань через газ визначається то- вщина газової подушки. Локація знизу має переваги, тому що при цьому потрібна менша потужність випромінювача й менше посилення сигналу в прийомній частини рівнеміра.

Звичайно діапазон робочих частот становить 20-100 кГц при зонду- ванні через газ і 0,1 - 2 МГц при зондуванні через рідину.

Недолік локаційних рівнемірів - їхня підвищена чутливість до вклю- чень у рідині (мікросуспензій, бульбашок газу). Цей недолік відсутній у двоканальних рівнемірів, що працюють за схемою збігів. У цьому випадку випромінювання ультразвукових коливань здійснюється одночасно двома да- тчиками. Відбиті сигнали підсилюються й підсумовуються, спрацьовування системи вимірювання часу відбувається тільки від сумарного сигналу. Якщо ж через наявність включень у зоні роботи якого-небудь датчика один з відби- тих сигналів випереджає інший, система вимірювання часу не спрацьовує й, тим самим, виключається можливість помилкового вимірювання рівня. Ін- ший спосіб усунення впливу неоднорідності рідини й деформації рівня - ви- користання звуководів. У цьому випадку локація рівня провадиться зверху, але не через газ, а через спеціальний рідинний або металевий звуковод. У то- чці зустрічі звуковода з рідиною відбувається відбиття сигналу, за часом приходу якого до приймача й визначається положення рівня рідини. Такі рів- неміри (зі звуководами) мають порівняно невисоку точність (порядку ±3%), але значно розширюються їхні експлуатаційні можливості. Зокрема, вони можуть використовуватися для вимірювання рівня низькокиплячих рідин, при високих температурах контрольованих речовин.

Принцип дії *дисипативних ультразвукових рівнемірів* заснований на явищі розсіювання (поглинання) звукової енергії в речовині. У найпрості- шому випадку дисипативний рівнемір складається з випромінювача В і приймача П, встановлених на дні й кришці посудини.

Вихідний сигнал U рівнеміра, пропорційний відношенню інтенсивно- стей звукових хвиль що випромінюється та реєструється, пов'язаний з по- точним значенням рівня залежністю

U  e2h2 1  ,

(6.6)

де α1, α2 – коефіцієнти загасання амплітуди звукової хвилі в рідині й газі відповідно.

П

101



2

Рисунок 6.8 – Диссипативний ультразвуковий рівнемір

Нелінійність функції перетворення (градуювальної характеристики), а також низький ККД, обумовлений відбиттям звукової енергії від границі розділу рідина-газ (наприклад, інтенсивність заломленої ультразвукової хвилі при проходженні через межу вода-повітря становить усього 0,001 від падаючої), перешкоджає промисловому освоєнню дисипативних рівнемі- рів.

Принцип дії резонансних рівнемірів полягає в збудженні коливань стовпа газу над рівнем рідини й у фіксації резонансної частоти, при якій спостерігається виникнення стоячої хвилі (рис.6.9).

Датчик рівнеміра являє собою трубчастий резонатор достатньої для утворення стоячої хвилі довжини L (L повинна бути не менш трьох діаме- трів резонатора й забезпечувати необхідний діапазон вимірювання рівня h). Для збудження коливань у резонаторі використовуються магнітоелект- ричні перетворювачі, М - зазвичай стрічкові мікрофони.

Основні недоліки резонансних рівнемірів - складність і громіздкість конструкції (особливо при великих діапазонах вимірювань рівня), а також істотний вплив на їхні показання змін швидкості з поширення звуку в га- зовому середовищі.

M



102

L 2

H

Рисунок 6.9 – Схема резонансного рівнеміра

* 1. Електричні рівнеміри

Принцип дії електричних рівнемірів (рис. 6.10) заснований на розходженні електричних властивостей рідин і газів. При цьому ріди- ни, рівень яких вимірюється, можуть бути як провідниками, так і діелект- риками; гази ж, що перебувають у надрідинному просторі, завжди діелект- рики. Основним параметром, що визначає електричні властивості провід- ників, є їхня електропровідність, а діелектриків - відносна діелектрична проникність, що показує, у скільки разів у порівнянні з вакуумом зменшу- ється в даній речовині сила взаємодії між електричними зарядами.

R(h)

Рисунок 6.10 – Схема електричного рівнеміра



R=0

Залежно від того, який вихідний параметр (опір, ємність або індук- тивність) первинного перетворювача „реагує" на зміну рівня, електричні рівнеміри підрозділяються на кондуктометричні, ємнісні й індуктивні.

Кондуктометричні рівнеміри (рівнеміри опору) застосовуються для вимірювання рівнів електропровідних рідин (у тому числі, і рідких металів).

Первинний перетворювач кондуктометричного рівнеміра являє со-

бою два електроди, глибина занурення яких у рідину й визначає поточне значення її рівня. Вихідним параметром перетворювача є його опір або провідність. При вимірюванні рівня „надпровідних" рідин (наприклад, рід- ких металів) можливе застосування кондуктометричних рівнемірів з одним електродом, роль другого електрода при цьому виконує заземлена посудина.

Первинний перетворювач ємнісного рівнеміра (рис. 6.11) є коаксіаль- ним циліндричним конденсатором, внутрішньою обкладкою якого слу- жить металевий зонд 1 покритий ізоляцією 2. Зонд розташований по осі металевої труби 3, що є зовнішньою обкладкою датчика-конденсатора. За- зор між зовнішньою поверхнею ізоляції зонда й зовнішньою обкладкою називається робочим зазором, що сполучається через отвори в нижній центрувальній втулці й у зовнішній трубі з судиною, у якій вимірюється рівень. Рідина, потрапляючи через ці отвори в робочий зазор датчика, змі- нює його ємність.

Вимірювальна схема (вторинний перетворювач) реєструє різницю ємностей датчика при поточному і нульовому значеннях рівня.



1

2

3

Рисунок 6.11 – Ємнісний рівнемір

h

H

Первинний перетворювач індуктивних рівнемірів (рис. 6.12) фактич- но є котушкою індуктивності. Провідна рідина при цьому грає або роль шунта, що змінює число витків котушки, або роль екрана, що впливає на коефіцієнт самоіндукції котушки. У першому випадку використовуються котушки з оголеними витками. При переміщенні рівня рідини, що володіє високою електропровідністю, частина витків шунтується й відповідним чином міняє індуктивність котушки первинного перетворювача - датчика.

Екрануючий ефект провідної рідини полягає у виникненні в ній ви- хрових струмів (струмів Фуко), електромагнітне поле яких робить розмаг- нічуючи дію на поле вимірювальної котушки. При цьому датчик викону- ється у вигляді котушки, поміщеної в захисний чохол. Чохол виключає ко- нтакт котушки з контрольованою рідиною, забезпечує можливість прове- дення монтажно-демонтажних робіт без порушення герметичності судини (що особливо важливо, наприклад, при вимірюванні рівня рідких теплоно- сіїв у ядерних реакторах).



H

Рисунок 6.12 – Схема індуктивного рівнеміра

h

* 1. Оптичні рівнеміри

При вимірюванні рівня рідин оптичними методами можуть бути ви- користані різні явища, пов'язані із проходженням світла через середовища, що утворюють поверхню розділу, - відбиття або заломлення світла на по- верхні розділу, послаблення його інтенсивності в поглинаючому середо- вищі й інше. Однак на практиці найбільше поширення одержали оптичні рівнеміри з візуальною фіксацією межі розділу рідина-газ і фотоелектричні рівнеміри, що використовують ефект відбиття світла від поверхні рідини.

Візуальні рівнеміри складаються з прозорих вставок в стінках посу- дини або з сполучених з посудиною мірних трубок з нанесеною на них шкалою.

Візуальні рівнеміри - найпростіші й у той же час самі точні засоби вимірювання рівня.

Принципова схема фотометричного рівнеміра відбиття показана на рис. 6.13.

Світловий промінь від лампи Л проходить через конденсаторну лінзу К и через вікно вводиться в судину. Падаючи під кутом *i* на поверхню рі- дини, світло відбивається від неї й попадає через оптично прозору стінку

на протяжний приймач випромінювання П. Координата приймача *у*, у якій фіксується максимальна освітленість, характеризує поточне значення рівня.

Аналогічним чином може бути побудований і фотоелектричний рів- немір заломлення.

Найбільш істотний вплив на погрішність оптичних рівнемірів робить стан поверхні рідини. Збурювання поверхні, поява на ній піни, крен посу- дини спотворюють результати вимірювання рівня. Для усунення (змен- шення) цих впливів використовують лазерні джерела світла, волоконні сві- тловоди й різні компенсаційні схеми.



Л

К

П

i i

Рисунок 6.13 – Схема фотометричного рівнеміра відбиття

H

hi

yi

* 1. Теплові рівнеміри

Теплові рівнеміри засновані або на використанні розходження тем- ператур рідини й парогазової суміші над нею (дилатометричні рівнеміри), або розходження їх теплопровідностей (терморезистивні рівнеміри й рів- неміри термо-е.р.с.). Чутливим елементом дилатометричного рівнеміра є стрижень або трубка, омивані рідиною й парогазовою сумішшю.

У результаті теплообміну між чутливим елементом, рідиною й газом (рис. 6.14) чутливий елемент здобуває певну температуру, пропо- рційну температурам рідини й газу, а також поточному значенню рівня рі- дини в судині. Отже, при сталості температур рідини й газу середня тем- пература чутливого елемента буде мірою поточного значення рівня. Про середню температуру чутливого елемента судять або по його відносному подовженню, або по тиску рідини або газу, що заповнює його внутрішню порожнину.

Рисунок 6.14 – Схема теплового рівнеміра



tг

р(h)

tр

h

Дилатометричні рівнеміри застосовують при вимірюванні рівня кон- денсованих рідин, тобто коли температури рідини й парогазової суміші над нею відносно стабільні й при цьому значно відрізняються між собою.

Незважаючи на простоту й надійність дилатометричні рівнеміри внаслідок малих діапазонів вимірювань (не більше 0,75 м) і невисокої точ- ності не одержали широкого промислового застосування.

Чутливий елемент тензорезистивних рівнемірів (рис. 6.15) є по- міщеним у посудину резистором, електричний опір якого визначається йо- го температурою.

I= const



t2

t1

t0

Un

H

Рисунок 6.15 – Схема тензорезистивного рівнеміра

h

Для створення градієнтів температур у рідкій і газовій фазах засто-

совують прямий і непрямий підігріви резистора. Прямий підігрів здійсню- ється за рахунок тепла, що виділяється при проходженні через резистор електричного струму, непрямий - за допомогою вмонтованого в датчик пі- дігрівального елемента.

Внаслідок різної інтенсивності теплопередачі від нагрітого тіла до рідини й газу, ділянки резистора, що перебувають у зіткненні з різними фазами, будуть мати різну температуру й, отже, різний електричний опір. За опором резистора в цьому випадку можна судити про поточне значення рівня, тобто вихідним параметром датчика є опір резистора або, що за умови сталості сили струму I = const, еквівалентно спаданню напруги Un на резисторі.

Зазвичай чутливий елемент тензорезистивних рівнемірів являє со- бою вертикально натягнутий тонкий дріт з великим погонним електрич- ним опором, що забезпечує його високу чутливість.

* 1. Вимірювання рівня сипких тіл

Вимірювання рівня сипких тіл у бункерах і інших пристроях значно відрізняється від вимірювання рівня рідин, тому що характер розташуван- ня матеріалу в об'єкті не дозволяє говорити про його рівень як про горизо- нтальну поверхню. Велика розмаїтість матеріалів, рівень яких необхідно вимірювати в енергетиці й промисловості, вимагає застосування різних методів і конструкцій рівнемірів.

Технічні засоби, призначені для вимірювання локалізації рівня сип- ких тіл, підрозділяють на електромеханічні, електричні, електронні, пнев- матичні, радіоактивні й вагарні.

Крім того, застосовують також масові рівнеміри, принцип дії яких заснований на зважуванні бункера з пилом. Як вимірювальний перетворю- вач у них служить гідравлічна месдоза, що є опорою для однієї з лап бун- кера. Месдоза являє собою сталевий корпус із поршнем, заповнений ріди- ною. Внутрішня порожнина корпуса сполучається з манометром, що при навантаженні бункера на поршень вимірює тиск рідини, пропорційний ма- сі пилу в ньому. Погрішність цього способу вимірювання ± 10%.

Останнім часом замість месдоз використовують магнітопружні пере- творювачі. Вимірювальна схема приладу з таким чутливим елементів по- будована у вигляді неврівноваженого моста. Як вторинні прилади служать потенціометри або вольтметри.

# 7 ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ТІЛ І СЕРЕДОВИЩ

* 1. Основні поняття та визначення

Вологість газів, твердих тіл і рідких середовищ є одним з важливих показників цілого ряду технологічних процесів у теплоенергетиці, елект- роенергетиці, металургійній, хімічний, харчовій, будівельній галузях про- мисловості. Вологість повітря та газів для технічних вимірах може бути охарактеризована наступними параметрами:

1. абсолютною вологістю, яка показує кількість водяної пари, що мі- ститься в одиниці обєму газу, кг/м3

  mn ; (7.1)

n V

1. вологовмістом - масою водяної пари, віднесеної до маси сухого газу, г/кг

d  mn

mnb

; (7.2)

1. температурою точки роси - температурою, при якій газ стає насиченим водяною парою, що міститься в ньому;
2. відносною вологістю, яка є відношенням абсолютної вологості газу до максимально можливої вологості цього газу при даній температурі, %

  n

max

. (7.3)

Вологість твердих і сипучих тіл може бути охарактеризована насту- пними параметрами: 1) вологовмістом – відношенням маси вологи до маси абсолютно сухого тіла; 2) вологістю – відношенням маси вологи до маси вологого тіла. Часто ці величини виражаються у відсотках.

В залежності від цілей і задач конкретного технологічного процесу застосовують ті або інші параметри, що характеризують вологість. Напри- клад, при вимірюванні малих вмістів вологи в чистих газах доцільніше ко- ристуватися вологовмістом; при транспортуванні газів по трубопроводах необхідно знати температуру точки роси: а дуття в металургійному вироб- ництві краще характеризувати відносною вологістю.

Вологовміст, температура точки роси і відносна вологість для повіт- ря і газів можуть бути визначені за h-d діаграмою вологого повітря (для тиску 100кПа і невеликих концентрацій пари) або за S-d діаграмою для змінного тиску.

Для вимірювання вологості матеріалів необхідно враховувати форми зв'язку вологи з матеріалом і гігрометричний взаємозв'язок матеріалу і на-

вколишнього повітря. Вологовмісні матеріали можуть бути колоїдними, капілярно-пористими і колоїдними капілярно-пористими тілами. До колої- дного відносяться тіла типу желе, тіста, повидла і т.п., до капілярно- пористих — керамічний матеріали, пісок і т.п. Більшість промислових ма- теріалів є колоїдними капілярно-пористими тілами. Кількість вологи, що може бути поглинена матеріалом, залежить від форми, розмірів і розташу- вання капілярів, а також від форм зв'язку води з матеріалом. При іонній і молекулярній формах зв'язку води з матеріалом (гідратна вода) її не мож- на видалити з матеріалу сушінням або віджиманням. Для абсорбційної, ос- мотичної або фізико-механічної форм зв'язку волога може бути видалена з матеріалу в процесі сушіння. Різні форми зв'язку вологи з матеріалом впливають на його фізичні характеристики по-різному, і встановлення за- лежності фізичних властивостей матеріалу від вмісту вологи досить важ- ке. Тому і вимір вологості твердих і сипучих матеріалів часто викликає утруднення і приводить до неоднозначності градуювальних характеристик.

* 1. Методи вимірювання вологості повітря і газу

В даний час найбільше поширення в технологічних процесах одер- жали наступні методи вимірювання вологості газів і повітря:

* + психрометричний;
  + гігрометричний;
  + температури точки роси.

Психрометричний метод вимірювання вологості оснований на вимірю- ванні психрометричної різниці температур між «сухим» і «мокрим» тер- мометрами. Мокрий термометр змочується через спеціальний гніт водою. Випаровування, а відповідно й охолодження з поверхні резервуара мокро- го термометра тим більше, чим нижче вологість газу. Тому різниця темпе- ратур сухого і мокрого термометрів залежить від вологості газу.

Метод точки роси базується на визначенні температури, при якій газ стає насиченим вологою, що знаходиться в ньому. Ця температура визна- чається за початком конденсації водяної пари на дзеркальній поверхні, те- мпература якої повинна встановлюватися любою в інтервалі температур роботи вологоміра.

Гігрометричні методи*,* засновані на залежності фізичних властивостей гігроскопічних матеріалів від вологості навколишнього середовища. До них відносяться:

* гігрометри, що використовують подовження знежиреного людського волосся від вологості повітря;
* електричні гігрометри, які використовують залежність опору або діе- лектричної проникності гігроскопічного матеріалу від вологості на- вколишнього повітря.

Інші методи вимірювання вологості газів (повного поглинання, дифу- зійний, інфрачервоного поглинання, теплопровідності тощо) не знайшли широкого застосування для технологічних процесів.

Розглянемо характерні риси окремих методів.

Психрометричний метод базується на залежності між парціальним тиском пари в парогазовій суміші і показаннями сухого і мокрого термо- метрів

рн.м. – р = АВ(tc – tм), (7.4)

де: р - парціальний тиск пари в парогазовій суміші;

рн.м. - парціальний тиск насиченої пари для температури суміші tм; В - барометричний тиск;

А – психрометрична стала;

tc і tм - температури сухого і мокрого термометрів відповідно. Відносна вологість може бути визначена у такий спосіб

  p 100  100 [p

* AB(t  t ) ,

pn.c. pn.c.

n.m. c m

де рн.с. - парціальний тиск насиченої пари для температури суміші tс. У зв'я- зку з тим що рн.м. і рп.с однозначно визначаються за tc і tм; якщо А = const, можна одержати залежність

 = f(tc – tm, tc). (7.5)

За цією залежністю можна скласти психрометричні таблиці. Ці таб- лиці можуть бути різними для різних конструкцій мокрого термометра, Психрометрична постійна А визначається умовами тепловідводу від тер- мометра через гніт у навколишнє середовище (розмірами і формою резер- вуара або гільзи термометра, теплопровідністю гільзи і тканини гнота, змочуваністю тканини й інших факторів), тому практично для кожної но- вої конструкції коефіцієнт А буде відмінним від інших. Для забезпечення сталості А для кожної конструкції забезпечують такий режим обдуву мок- рого термометра (як правило, 3 м/с), при якому А = const. Залежність мо- же бути апроксимована рядом прямих  = const у координатах tc, tm (рис. 7.1). Вважаючи, що прямі  = const перетинаються в одній точці з коорди- натами tа, tb, можна вважати

  f  tm  ta  . (7.6)





 c  tb 

t

Принципова вимірювальна схема психрометра з термометрами опору представлена на рис.7.2. При відповідному підборі пліч мостів можна вва-

жати, що

= mUcd,

Uab  k1 (tm  ta ), Ucd  k2 (tc  tb ) , в момент компенсації Uab = Uef

де m – відносне положення покажчика реохорда.

Тоді

m  k1 (tm  ta ) . (7.7)

k2 (tc  tb )

Шкала психрометра градуюється в процентах відносної вологості. Можливі різні модифікації такої схеми, але, як правило, принцип її дії за- лишається незмінним.

До переваг психрометричного методу варто віднести достатньо ви- соку точність і чутливість для температур вище 0°С. До недоліків методу відноситься зменшення чутливості і точності для низьких температур, а також похибка, зв'язана із змінністю психрометричної постійної А.

tb

tm , C

80

=100%

60

40

=20%

ta

tc , C

Рисунок 7.1 – Залежність відносної вологості від температур мокрого і сухого термометрів



e

a

b

c

tM

tC

f

РД

ЕП

Рисунок 7.2 - Принципова вимірювальна схема психрометра з термометрами опору

* 1. Метод точки роси

За температурою точки роси можна визначити абсолютну вологість або вологовміст, а якщо додатково виміряти температуру газу, то можна визначити і відносну вологість. Цей метод є одним з найбільш точних і до- зволяє робити вимірювання вологості за будь-яких тисків газу як для плю- сових, так і для мінусових температур. Основним чутливим елементом во- логомірів, що базуються на вимірюванні температури точки роси, є дзер- кало, яке обдувається аналізованим газом. Це дзеркало повинне охолоджу- ватися таким чином, щоб на ньому відбувалася конденсація вологи, що знаходиться в аналізованому газі. При цьому повинна фіксуватися темпе- ратура, для якої починається випадання вологи (роси).

Для технічних вимірювань розроблені автоматичні вологоміри точки роси. Одна зі схем такого вологоміра представлена на рис. 7.3. У камеру 1 через патрубок 2 надходить очищений від домішок і пилу аналізований газ постійного тиску, що потім видаляється патрубком 3*.*

Проходячи через камеру 1*,* газ обмиває дзеркало 4*.* На дзеркало 4 від лампи 5 через лінзу 6 направляється промінь світла, який відбившись від дзеркала 4, попадає через лінзу 7 на фотоелемент 8*.* Виникаючий у фотое- лементі струм через підсилювач 9 надходить на регулятор 10*,* котрий змі- нює живлення нагрівача 11*.* Дзеркало 4 охолоджується рідиною, що над- ходить через патрубок 12 і відходить через патрубок 13. Температура рі- дини може змінюватися нагрівачем 11. Температура дзеркала вимірюється

термоелектричним термометром, підключеним до вимірювального прила- ду 14*.* Якщо на дзеркалі немає вологи, то промінь світла від нього практи- чно без втрат надходить на фотоелемент. У цьому випадку регулятор зме- ншує нагрівання охолодної рідини, температура якої зменшується доти, поки на дзеркалі не випадає роса. У цьому випадку на фотоелемент буде надходити ослаблений світловий потік (падаючи на дзеркало, покрите плі- вкою роси, світло буде розсіюватися) і регулятор буде збільшувати нагрі- вання охолодної рідини.



14

12

11

13

3

1

7

8

9

10

2

6

5

Рисунок 7.3 - Схема автоматичного вологоміра точки роси

Таким чином, температура дзеркала буде підтримуватися близької до температури точки роси. Чисельне значення цієї температури фіксується приладом 14. Крім розглянутої вище інші можливі варіанти схеми, але принцип роботи один - створюються умови для випадання роси (початку конденсації) і визначається температура, при якій це відбувається. При практичній реалізації методу точки роси існують певні труднощі. По- перше, фіксація самого моменту початку конденсації («випадання роси») залежить від методу фіксації (оптичний, кондуктометричний тощо). По- друге, температура точки роси може залежати від стану поверхні, на якій відбувається конденсація. Наприклад, наявність жиру або нафтопродуктів на поверхні конденсації істотно занижує температуру точки роси. По-

третє, при вимірі вологості агресивних газів температури точки роси мо- жуть істотно відрізнятися від розрахункових. Крім того, агресивні гази можуть викликати корозію поверхні, на якій відбувається конденсація.

В гігрометричних вологомірах чутливий елемент повинен знаходи- тися в гігрометричній рівновазі з вимірюваним газом. У практиці техніч- них вимірювань одержали поширення наступні різновиди гігрометричних перетворювачів: електролітичні, електролітичні з підігрівом і сорбційні. В електролітичних гігрометрах вимірювальний перетворювач має вологочу- тливий елемент, що містить електроліт. Зміна вологості газу викликає змі- ну кількості вологи, що утримується у вологочутливому елементі, що при- водить до зміни концентрації електроліту у вологочутливому елементі і ві- дповідній зміні його опору або електропровідності. Як електроліт найчас- тіше застосовують хлористий літій. Вимірювальні схеми електролітичних гігрометрів являють собою різні варіанти мостових вимірювальних схем. До недоліків електролітичних гігрометрів можна віднести нестабільність їх градуювальних характеристик, а також вплив температури і концентрації розчиненої речовини на їхні показання;

Електролітичні перетворювачі з підігрівом за своєю будовою близькі до електролітичних перетворювачів. Однак принцип дії їх відрізняється від електролітичних, Зміна електропровідності перетворювача внаслідок зміни вологості газу викликає зміну температури перетворювача. Якщо вологість газу збільшується, то електропровідність перетворювача збільшується, що призводить до зростання струму, збільшенню температури перетворювача і випаровуванню вологи з перетворювача. Це у свою чергу призводить до зменшення електропровідності, струму через перетворювач і температури перетворювача. Таким чином, автоматично підтримується режим, що від- повідає рівноважному станові між парціальним тиском водяної пари в ана- лізованому газі і парціальним тиском водяної пари над насиченим розчи- ном електроліту. Температура, що відповідає цій рівновазі, виміряється яким-небудь термометром. Електролітичні гігрометри з підігрівом відносно прості і надійні. Їхні характеристики практично не залежать від запилення або забруднення, швидкості вимірюваного газу, його тиску і напруги живлення.

У сорбційних гігрометрах використовується зміна фізичних власти- востей сорбційних матеріалів (кераміки, мікропористих матеріалів, окису алюмінію тощо) від вмісту в них вологи, що визначається вологістю газу. Як правило, зі зміною вологовмісту змінюється або електричний опір, або ємність, або тангенс діелектричних втрат, або який-небудь інший па- раметр вимірювального перетворювача. Вимірювальна схема приладу ви- значається вихідним сигналом вимірювального перетворювача. Прилади

цього типу відрізняються індивідуальними градуювальними характеристи- ками, тому широко їх застосовувати в промислових умовах важко.

* 1. Методи вимірювання вологості твердих і сипучих тіл

Методи вимірювання вологості твердих і сипучих тіл умовно можна розділити на дві групи:

1. прямі методи, що дозволяють визначати масу вологи або сухої речо- вини в пробі;
2. непрямі методи, що визначають вологість за параметром, функціона- льно зв'язаним з вологістю.

Прямі методи відрізняються високою точністю але дуже довготрива- лі (до 10–15 ч).

Непрямі методи характеризуються високою швидкодією і значно ме- ншою точністю вимірювань.

lgR



R=F(W)

8

6

4

2

0 20 40 60 80 W,

Рисунок 7.4 - Залежність електричного опору капілярно-пористих тіл від вологості

У технічних вимірюваннях застосовуються майже винятково непрямі методи. З непрямих методів найбільше поширення одержали електричні методи вимірювання вологості, такі як кондуктометричний, ємнісний і де- які інші. Як відзначалося вище, більшість промислових матеріалів є капі- лярно-пористими тілами. У сухому виді ці матеріали є діелектриками з пи- томим опором 108 Омм і вище. При зволоженні капілярно-пористі тіла можуть стати провідниками з питомим опором 104 Омм. Залежність елек- тричного опору від вологості для капілярно-пористих тіл (рис. 7.4)

R = c/wn, (7.8)

де c - постійна;

w - вологість матеріалу; n - показник степеню.

Постійна с, і показник ступеня п визначаються для кожного матеріа- лу експериментально. Статична залежність опору від вологості матеріалу забезпечує високу чутливість кондуктометричного методу. Однак його за- стосування обмежене великим числом величин, що впливають на резуль- тати вимірювань, таких як температура, структура матеріалу, щільність на- сипки, хімічний склад, наявність електролітів, тому цей метод використо- вують практично тільки в лабораторних умовах.

Ємнісний метод базується на тому, що зміна вологості капілярно- пористих тіл призводить до істотної зміни їхньої діелектричної проникнос- ті. У сухих тіл діелектрична проникність  = 16, а у води  = 81. Зміну ді- електричної проникності внаслідок зміни вологості матеріалу визначають, як правило, за зміною ємності конденсатора, між обкладинками якого міс- титься аналізований матеріал. Перетворювач ємнісного вологоміра вико- нують у вигляді двох плоских пластин або двох концентричних циліндрів, простір між якими заповнюється аналізованим матеріалів шляхом заси- пання при падінні матеріалу з визначеної висоти. У цьому випадку забез- печується гарна відтворюваність результатів вимірювання. Ємність кон- денсатора визначених геометричних розмірів може бути виражена формулою

С = k, (7.9)

де  – діелектрична проникність матеріалу, зумовлена його вологістю;

k – постійна, зумовлена геометричними розмірами і формою конденсатора. Включення ємнісного перетворювача у високочастотний коливаль-

ний контур дозволяє використовувати резонансні схеми лампових або на- півпровідникових приладів для вимірювання ємності перетворювача, а по ньому і вологості матеріалу. Ємнісні перетворювачі малочутливі до складу матеріалу, його структури і контактного опору між електродами і матеріа- лом. Оскільки для більшості матеріалів діелектрична проникність залежить від температури, у промислових приладах передбачається автоматичне введення поправки на зміну температури. Похибка ємнісних вологомірів може складати 0,2 - 0,5 %. Однак методика відбору проби (заповнення ма- теріалом простору між обкладинками конденсатора) може впливати на ре- зультати вимірювання. Наприклад, навіть зміна розмірів часток (шматоч- ків) аналізованого матеріалу істотно впливає на показання вологоміра. У зв'язку з цим застосування вологомірів твердих і сипучих тіл у технічних вимірах використовується рідко.

# 8 АНАЛІЗ СКЛАДУ ГАЗІВ

* 1. Класифікація газоаналізаторів

Засоби вимірювання, які застосовуються для аналізу складу газів, на- зиваються газоаналізаторами. На основі безперервного автоматичного кон- тролю складу газів здійснюється автоматизоване керування хіміко- технологічними процесами, зв'язаними з одержанням і використанням га- зів у металургії, коксохімічному виробництві, нафтопереробці, газовій промисловості. При спалюванні органічних палив на теплових електрич- них станціях автоматичні газоаналізатори використовуються для контролю за процесом горіння і визначення необхідного надлишку повітря. Не менш важливі функції покладені на прилади газового аналізу, що працюють у системах, що забезпечують безпечне функціонування технологічних об'єк- тів. До числа таких приладів відносяться газоаналізатори, що вимірюють концентрацію водню в системі охолодження турбогенераторів, у газодув- ках апаратів з радіоактивним теплоносієм на АЕС тощо.

В останні роки в зв'язку з посиленням уваги до охорони навколиш- нього середовища різко розширилося виробництво і використання газоана- лізаторів, призначених для контролю вмісту шкідливих домішок у газових викидах промислових підприємств і електричних станцій, у повітрі вироб- ничих приміщень і атмосфері. Так, відповідно до ДСП-201-97 "Державні санітарні правила охорони атмосферного повітря населених місць" для ко- нтролю за якістю повітря населених пунктів здійснюється періодичне ви- мірювання концентрації таких основних забруднюючих речовин, як сірчи- стий газ, окис вуглецю, двоокис азоту, пил тощо.

Для вимірювання концентрації одного з компонентів газової суміші використовується якась фізико-хімічна властивість цього газу, що відріз- няється від властивостей інших газів. Чим більша ця відмінність і чим вона специфічніша, тим вищою буде чутливість методу і простіше здійснюється підготовка проби газу. Розмаїтість використовуваних у газоаналізаторах методів вимірювання зумовлена кількістю аналізованих компонентів газо- вих сумішей і широким діапазоном зміни їхніх концентрацій.

Переважна більшість промислових автоматичних газоаналізаторів призначена для вимірювання концентрації одного компонента в суміші га- зів. У цьому випадку суміш газів розглядається як бінарна, у якій зумовле- ний компонент впливає на вимірювану фізико-хімічну властивість суміші, а інші компоненти, незалежно від їхнього складу і концентрації, не впли- вають і вважаються другим компонентом суміші.

Існують газоаналізатори, призначені для аналізу різних складових багатокомпонентних газових сумішей, у більшості випадків ці прилади ви- користовуються в лабораторній практиці. Газоаналізатори градуюються у відсотках за об’ємом, г/м3, мг/л. Перша одиниця вимірювання є більш зру- чною, оскільки процентний вміст компонентів газової суміші зберігається при зміні температури і тиску. Відтворення одиниць вимірювання концен- трації компонентів газових сумішей проводиться за допомогою атестова- них еталонних газових сумішей.

Існуюча класифікація газоаналізаторів ґрунтується на фізико- хімічних властивостях, покладених в основу вимірювання концентрації компонентів суміші, які визначаються в конкретному випадку, і включає наступні основні групи приладів: механічні, теплові, магнітні, оптичні, хроматографічні, електричні і мас-спектрометричні. Шість перших груп приладів є найбільш розповсюдженими.

Газоаналізатори на відміну від засобів вимірювання температури чи тиску є установкою, що містить, крім вимірювального перетворювача, (приймача) ряд пристроїв, які забезпечують відбір, підготовку і транспор- тування проби газу через прилад. Для газоаналізаторів характерна наяв- ність двох груп приладів. У першу входять вимірювальні прилади, у другу

— індикатори, сигналізатори, детектори витоку газів. Прилади другої групи часто є переносними, більш простими за конструкцією і мають мен- ше число допоміжних пристроїв.

* 1. Об'ємні хімічні газоаналізатори

У механічних газоаналізаторах вимір компонентів, вміст яких необ- хідно виміряти, проводиться на підставі зміни механічних параметрів ста- ну або відповідних властивостей газової суміші. До числа вимірюваних ве- личин у цих приладах відносяться зміни обєму або тиску проби газової суміші, її в'язкості, щільності, швидкості поширення звуку.

Найбільш розповсюдженими приладами цього типу є об'ємні (волю- метричні) газоаналізатори (рис. 8.1). У них про вміст даного компонента судять по зміні обєму газової суміші в результаті селективного поглинан- ня, каталітичного окислювання або спалювання зумовленого компонента. Оскільки для селективного видалення зумовлених компонентів використо- вуються хімічні реакції, прилади часто називають об'ємними хімічними га- зоаналізаторами, що відносяться до приладів періодичної дії. З їхньою до- помогою можна зробити вимірювання концентрації в суміші газів наступ- них компонентів: двоокису вуглецю із сірководнем і двоокисом сірки (су-

ма кислих парів і газів), кисню, окису вуглецю, водню, неграничних і гра- ничних вуглеводнів, азоту.

При визначенні змісту СО2, і SO2 використовується розчин лугу, при цьому протікають наступні реакції

СО2 + 2КОН = К2СО3 + Н2О, SO2 + 2КOН = К2SO3 + Н2O.

Для поглинання водню й окису вуглецю використовується лужний розчин напівхлористої міді. Кисень поглинається лужним розчином піро- галлолу, а неграничні вуглеводи - бромною водою. Водень і граничні ву- глеводні можуть видалятися із суміші спалюванням, а окис вуглецю - ка- талітичним окислюванням. Похибка такого методу значною мірою визна- чається похибкою вимірювання зміни об’єму, у зв'язку з чим початковий і залишковий об’єми проби газу повинні мати однакові температуру і тиск. Переважна більшість газоаналізаторів, що працюють на цьому принципі вимірювання, відносяться до лабораторних приладів, у яких відбір проби й інші операції виконуються вручну.

Повітря

7

5



Газ

9

8

2

5

1

10

4

6

3

Рисунок – 8.1 Схема газоаналізатора ГХП-2

Принцип дії об'ємних хімічних газоаналізаторів розглянемо на прик- ладі газоаналізатора ГХП-2 (рис. 8.1), призначеного для вимірювання двох компонентів газової суміші: СО2 й О2. Прилад містить вимірювальну бю- ретку 1*,* з'єднану з гребінкою 2, до якої підключені дві поглинальних посу- дини 3, 4. Посудина 3 заповнена розчином їдкого калію і призначена для поглинання СО2, посудина 4 містить лужний розчин пірогаллолу для пог- линання О2. Оскільки останній розчин поглинає СО2, при проведенні ана- лізу спочатку визначають зміст СО2, а потім кисню. Всередині мірної бю- ретки знаходиться сполучена з атмосферою трубка 5*,* що використовується

для контролю тиску проби газу після поглинання даного компонента. Мір- на бюретка термостатована. Відбір проби газу і прокачування його через прилад здійснюються гумовою грушею 6. При прокачуванні газу кран 8 знаходиться в положенні, показаному на малюнку, напірна посудина 7 із замикаючою рідиною опущена і газ через трубку 5 виштовхується в атмо- сферу. При підйомі напірної посудини 7 замикаюча рідина при досягненні кінця трубки 5 відрізає від атмосфери пробу газу обємом 50 см3. У двох інших положеннях крана 8 проба газу в мірній бюретці 1 сполучається із посудинами 3 і 4. Фільтр 10 служить для очищення газу. У якості запірної використовується рідина, що не поглинає компоненти аналізованої газової суміші; часто застосовуються насичені розчини кухонної солі або хлорис- того кальцію.

Для проведення аналізу здійснюється наступна послідовність опера- цій. При відкритому крані 9, зазначеному положенні триходового крана 8 і опущеній напірній посудині 7 грушею 6 кілька разів забирається аналізо- ваний газ і прокачується через мірну бюретку в атмосферу. Потім при за- критому крані 9 піднімається напірна посудина 7 і замикаюча рідина від- тинає від атмосфери пробу газу. Кран 8 переводиться в праве положення, при якому аналізована проба витісняється при підйомі напірної посудини 7 рідиною з мірної бюретки в посудину 8*.* Для покращення контакту газу з поглинаючими рідинами посудини заповнені скляними трубками. Для по- вного поглинання СО2 здійснюється чотири-п'ять прокачувань шляхом пі- дняття й опускання напірної посудини 7.

Для вимірювання залишкового обєму газу із посудини 3 повертають пробу в мірну бюретку, плавно опускаючи напірну посудину 7. Обєм газу фіксується в момент збігу рівня в мірній бюретці і внутрішній трубці 5. При збігу цих рівнів тиск проби газу дорівнює атмосферному. Нижня зву- жена частина мірної бюретки градуюється безпосередньо у відсотках вміс- ту зумовленого компонента. Після фіксації вмісту СО2 в пробі кран 8 пере- водиться в ліве положення і замикаючою рідиною частина проби газу, що залишилася, витісняється в посудину 4. Для визначення змісту О2 далі пос- лідовно проводяться ті ж операції, що при вимірюванні вмісту СО2. Про процентний вміст О2 судять за зміною обєму проби газу, що залишилася. У процесі вимірювань не можна допускати зниження рівня замикаючої рі- дини нижче кінця трубки 5, тому що при цьому відбувається або підсмок- тування повітря, або виштовхування частини проби в атмосферу. Якщо це спостерігалося під час аналізу, то дослід необхідно повторити. Тривалість вимірювання концентрації двох компонентів складає 5 - 8 хв.

Ціна поділки мірної бюретки приладу ГХП-2 складає 0,1 мл. При

граничній похибці вимірювань обєму ±0,1 мл похибка в оцінці залишкового обєму проби складає ± 0,2%. Невисока точність оцінки зміни обєму не дозво- ляє використовувати ці газоаналізатори для вимірювання малих концентрацій.

Більш широкі можливості має газоаналізатор ВТИ, призначений для загального аналізу природних і промислових газів. Останнім часом для проведення аналізу складу газів частіше використовуються обємні газоа- налізатори закордонного виробництва, які мають різноманітні конструкції, хоча принцип їх дії такий самий.

До числа переваг об'ємного методу вимірювання концентрацій газів від- носяться: можливість вимірювання широкого кола компонентів газових сумішей шляхом підбору відповідних поглиначів або хімічних реакцій зв'язування; можливість аналізу багатокомпонентних газових сумішей; простота пристрою. Недоліками методу є низька точність аналізу (не вище 0,1—0,2 % загального обсягу проби); періодичність дії; необхідність частої заміни реактивів; складність створення на цьому принципі автоматичних приладів; громіздкість приладу через велике число скляних деталей.

* 1. Теплові газоаналізатори

У теплових газоаналізаторах вимірювання концентрації заданого компонента проводиться шляхом вимірювання теплових властивостей га- зової суміші, що залежать від концентрації компонента, вміст якого потрі- бно визначити.

Найбільш розповсюдженими приладами цього типу є газоаналізато- ри, робота яких базується на вимірюванні теплопровідності суміші (термо- кондуктометричні) і теплоти, що виділяється при реакції каталітичного окислювання заданого компонента (термохімічні). Представники цих груп приладів, як правило, є автоматичними пристроями, що працюють у складі інформаційно-вимірювальних і керуючих систем. Теплові газоаналізатори призначені, як правило, для безперервного аналізу складу бінарних сумішей.

* 1. Термо-кондуктометричні газоаналізатори

У таблиці показані теплопровідності різних газів для температур 100 і 500 °С, віднесені до теплопровідності повітря. Аналіз даних, показаних у таблиці, показує, що при температурі 100 °С теплопровідність таких газів, як Н2, СО2, SО2, СН4, Аr, Не, відрізняється від теплопровідності повітря.

З ростом температури теплопровідність газів зростає по-різному (табл.. 8.1), у зв'язку з чим при температурі 500 °С відносна теплопровід-

ність N2, Н2, О2, СО, Ar, He практично не змінюється, тоді як у СО2 тепло- провідність стає близька до одиниці, а в СН4 зростає від 1,45 до 2,13. Хара- ктер впливу температури на відносний коефіцієнт теплопровідності газів враховується при виборі температурних режимів роботи чутливих елемен- тів газоаналізаторів.

Таблиця 8.1 - Відносні теплопровідності газів для температур 100 і 500 С

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Газ | 100 °С | 500 °С | Газ | 100 С | 500 С |
| Повітря | 1 | 1 | Двоокис сірки | 0,38 | 0,53 |
| Азот | 0,98 | 0,97 | Кисень | 1,02 | 1,07 |
| Водень | 6,84 | 6,77 | Аргон | 0,66 | 0,66 |
| Двоокис вуглецю | 0,71 | 0,96 | Гелій | 5.56 | 5,32 |
| Окис вуглецю | 0.94 | 0,93 | Пари води | 0,78 | 1,16 |
| Метан | 1,45 | 2,13 |  |  |  |

Використання даного принципу вимірювання базується на тому, що між теплопровідністю газової суміші *,* теплопровідністю і і концентрацією сі *п* компонентів, що входять у її склад, існує близька до лінійної залежність.

Для вимірювання теплопровідності газової суміші використовується провідник, що нагрівається струмом, поміщений у камеру, заповнену ана- лізованою сумішшю. Якщо тепловіддача від провідника до стінок камери в основному здійснюється в результаті теплопровідності, то має місце на- ступна залежність

Q = 2l(tп – tc)/(D/d), (8.1)

де Q - кількість теплоти, що віддається провідником у секунду; l, d - довжина і діаметр провідника відповідно;

D - діаметр камери;

 - теплопровідність суміші газів;

tп і tc - температури провідника і стінок камери відповідно.

Якщо теплота Q, що віддається провідником, і температура стінок камери tc є сталими, а це залежить від температури навколишнього середо- вища, теплопровідність газової суміші буде однозначно визначати темпе- ратуру провідника, а отже, і його опір. Як провідник використовується дріт з металу, що має високий температурний коефіцієнт електричного опору і хімічною стійкістю, найчастіше застосовують платину, рідше во- льфрам, нікель, тантал.

Схема двох типів робочих чутливих елементів із платинового дроту представлена на рис. 8.2. У скляному корпусі 1 до платинових струмопід- водів 2 діаметром 0,15 мм підпаяна відкрита платинова спіраль 3 діамет-

ром 0,02 мм (рис. 8.2, а) або засклена 4 з діаметром 0,02 мм (рис. 8.2, б). У першому випадку опір чутливого елемента складає 10 Ом, у другому 40 Ом. Чутливий елемент другого типу захищений від агресивних впливів се- редовища, але йому властива велика інерційність.

а)



3

1

4

1

2

б)

Рисунок 8.2 - Будова робочих чутливих елементів

з відкритою (а) і заскленою (б) платиновою спіраллю

b



R1

ан. газ

R2

R0

ДЖС a

mV

R4

ан. газ

R3

Рисунок 8.3 - Вимірювальна мостова схема газоаналізатора

Для забезпечення максимальної чутливості по теплопровідності для газів СО2, Н2, а також зниження впливу тепловіддачі за рахунок випромі- нювання температура платинової спіралі встановлюється 80-100°С. З ме- тою зменшення впливу конвективного теплообміну газ до чутливого еле- мента подається внаслідок дифузійного обміну, що збільшує інерційність теплових газоаналізаторів.

* 1. Магнітні газоаналізатори

У магнітних газоаналізаторах, що використовуються для аналізу бі- нарних сумішей, концентрація зумовленого компонента виміряється за

зміною магнітних властивостей газової суміші. Гази за їхньою магнітною сприйнятливістю поділяються на парамагнітні, що втягуються в магнітне поле, і діамагнітні, що виштовхуються з нього. Найбільшу магнітну сприйнятливість має кисень, який відноситься до парамагнітних газів. У таблиці -- показані значення відносної об'ємної магнітної сприйнятливості для газів, причому знак мінус відноситься до діамагнітних газів.

Зіставлення даних, показаних у таблиці 8.2, показує, що гази, крім кисню, окису і двоокису азоту, є практично немагнітними, оскільки їхня об'ємна магнітна сприйнятливість на два порядки нижче, ніж у кисню. Та- ким чином, магнітні властивості газової суміші визначаються концентраці- єю кисню, оскільки NО і NО2, що є продуктами високотемпературних оки- сних реакцій, зустрічаються рідко й у малих концентраціях.

Таблиця 8.2 - Відносна об'ємна магнітна сприйнятливість газів

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Газ | Відносна об'ємна  магнітна сприй- нятливість | Газ | Відносна об'ємна  магнітна сприй- нятливість |
| Кисень О2 Повітря (21 % О2) Окис азоту NО  Двоокис азоту NО2 Метан СН4 | 1  0,211  0,363  0,0616  - 0,0123 | Водень Н2 Азот N2  Двоокис вуглецю СО2 Аміак NН3  Водяні пари H2O | -0,0011  -0,004  -0,0057  -0,0057  -0,004 |

Існує кілька методів вимірювання магнітної сприйнятливості суміші газів, найбільш розповсюджений з них зв'язаний з використанням явища термомагнітної конвекції. Остання являє собою рух кисневмісного газу в неоднорідному магнітному і тепловому полях. Основані на цьому ефекті газоаналізатори, що випускалися в СРСР і зараз випускаються кордоном, виконуються за одномостовою або двомостовою вимірювальними схемами.

* 1. Оптичні газоаналізатори

В оптичних газоаналізаторах концентрація заданого компонента вимірюється за зміною оптичних властивостей газової суміші, до числа яких відносяться показники переломлення, спектрального поглинання і випромінювання, спектральна щільність і т.д. Найбільш розповсюдженими є три групи оптичних газоаналізаторів:

1. інфрачервоного та ультрафіолетового поглинання;
2. спектрофотометричні;
3. фотокалориметричні.

Оптичні газоаналізатори застосовуються для аналізу мікроконцент- рацій вибухонебезпечних і токсичних домішок у промислових газах, для контролю повітря в атмосфері і виробничих приміщеннях.

* 1. Хроматографічні газоаналізатори

Хроматографічні газоаналізатори призначені для аналізу багатоком- понентних газових сумішей. В останні роки ці прилади стали застосовува- тися для аналізу складу рідин і твердих тіл. Хроматографи є приладами пе- ріодичної дії, більш складними будовою, ніж розглянуті вище газоаналіза- тори.

Процес вимірювання в цих приладах ділиться на дві стадії: хромато- графічний поділ газової суміші на окремі компоненти й ідентифікація (де- тектування) компонентів, що включає якісний і кількісний їхній аналіз. Хроматографічний поділ суміші на окремі компоненти, відкритий в 1903 р. М. С. Цвєтом, здійснюється за рахунок різної швидкості руху газів вздовж шару сорбенту, що зумовлена характером зовнішніх і внутрішніх міжмолекулярних взаємодій. В даний час за можливостями розділення й аналізу багатокомпонентних сумішей хроматографія не має конкуруючих методів. Хроматографію можна використовувати для аналізу низькокипля- чих газів, сумішей летучих і термічно стійких твердих і рідких речовин, температура кипіння яких досягає 500 °С и вище. До числа переваг цього методу відноситься також висока чутливість (що досягає при використанні іонізаційних детекторів 10-8 – 10-9 мг/мл) у сполученні з малим обємом проби, що відбирається, порівняно високою точністю і малим часом аналі- зу.

Принципова схема хроматографа і способу розділення суміші газів у колонку представлена на рис. 8.4, а,б. З балона 1 газ-носій надходить у хроматограф. Для підтримки постійної швидкості в процесі його роботи використовується регулятор 2, що містить редуктор, манометр і вимірник витрати газу.

У газ-носій дозатором 3 періодично вводиться проба аналізованого газу. У роздільній колонці 4*,* заповненій твердим або рідким сорбентом, аналізована суміш розділяється на компоненти. Уздовж шару сорбенту з більшою швидкістю рухаються гази, які найменше поглинаються сорбен- том. Тому в пробі суміші газів (рис. 8.4, (5), що містить три компоненти А, В і С, першим виноситься газ А, який найменш сорбується*,* а останнім – газ С, який сорбується найкраще.

Газ для аналізу

А+В+С С В А С В А



3

Газ-носій

2

8

Скидання

6 2

7

5

4

9

а)



В детектор

Газ-носій Проба

газу

Розділювальна б)

колонка

Рисунок 8.4 - Принципова схема газового хроматографа

Після поділу кожен компонент із газом-носієм утворить бінарну суміш, аналіз якої може бути зроблений різними методами, у тому числі розглянутими вище і реалізованими в детекторі *6.* Оскільки в процесі ви- мірювання властивості газу-носія можуть змінюватися, при пропущенні останнього через детектор фіксуються зміни його властивостей, викликані присутністю компонента аналізованої суміші.

На діаграмі самописного приладу, або на екрані монітора 7 вихід ко- жного з компонентів супроводжується піком, площа якого залежить від концентрації цього газу. Графік, що фіксує вихід компонентів, називають хроматограмою. Використання інтегруючих і цифродрукуючих пристроїв, обчислювальної машини автоматизує обробку хроматограм і дозволяє вве- сти інформацію про склад газів.

Хроматограма є носієм як якісної інформації - про вид компонентів суміші, так і кількісної - про їхні концентрації. Значення останньої визна- чається площею піка або його висотою. Оскільки поділ газів здійснюється за рахунок їх різних сорбційних властивостей, час виходу того або іншого компонента при постійній швидкості газу-носія визначає вид газу. Ця ха- рактеристика називається часом утримання tR. Вона чисельно дорівнює ін- тервалові часу від моменту введення проби газу до моменту, що відповідає максимумові піка. Більш стійкою характеристикою, що не залежить від ко- ливань швидкості *v* газу-носія, є утримуваний обєм газу-носія

VR = tRv. (8.2)

Особливістю хроматографічного методу аналізу є вплив на результати вимірювань великого числа взаємозалежних факторів, які можна розділити на п'ять груп:

1. параметри, що характеризують роботу розділяючої колонки; геометрія колонки (довжина, діаметр, форма), матеріал колонки, природа сорбенту, його пористість, зернистість, характер набивання, товщина рідкої плівки, температурний режим колонки;
2. параметри, зв'язані з газом-носієм: природа і наявність домішок, швидкість і тиск;
3. параметри, зв'язані з роботою дозатора: обєм проби, його стабільність, спосіб введення проби;
4. параметри, зв'язані з роботою детектора: чутливість, інерційність, лінійність градуювальної характеристики, стабільність;
5. параметри, зумовлені способом реєстрації вихідного сигналу детектора і методом обробки хроматограми: похибка, інерційність, чутливість вторинного приладу, швидкість руху діаграмного паперу, похибка розрахунку якісних і кількісних показників хроматографічного розподілу.

# ЛІТЕРАТУРА

1. Блинов О. М. Теплотехнические измерения и приборы / О. М. Блинов, А. М. Беленький, В. Ф. Бердышев. – М.: Металлургия, –1993. – 145 с.
2. Иванова Г. М. Теплотехнические измерения и приборы / Г. М. Иванова, Н. Д. Кузнецов.– М.: Высшая школа, 1984. – 245 с.
3. Головченко О. М. Теплотехнічні вимірювання та метрологія. Лабораторний практикум / О. М. Головченко, О. Ю.Співак, Л. В. Грумінська. – Вінни- ця: ВНТУ, 2006. – 91 с.
4. Мурин Г.А. Теплотехнические измерения / Г.А. Мурин. – М.: Энергия, 1979. – 424 с.
5. Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы / В. П. Преображенский. – М.: Энергия, 1978. – 704 с.
6. Григорьев В. А. Тепло - и массообмен. Теплотехнический эксперимент. Справочник. / В. А. Григорьев, В. М. Зорин. – М.: Энергоиздат, 1982. – 512 с.
7. Нубарян С. М. Контрольно-измерительные приборы в теплотехнических измерениях. / С. М. Нубарян. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 283 с.
8. Рыжков С. В. Теплотехнические измерения в судовых энергетических установках / С. В. Рыжков. – Л.: Судостроение, 1980. – 264 с.

# ГЛОСАРІЙ

абсолютна похибка absolute error

актинометр actinometer

безнульова no zero

буй beacon

вигинається bending

вимірювання measurement

витрата consumption

вихороутворення formation of vortex

відновлювальній renewable

відносна похибка relative error

відхилення deviation

впливаючих influencing

вторинний потік secondary flow

газозбірники gas collections

гофровані corrugated

дилатометричні dilatometric

довірча імовірність confidence probability

довірчий інтервал confidence interval

евтектичні сплави eutectic alloys

електровимірювальний electrical measuring

ентропія entropy

зазор clearance

залишковий residual

засіб вимірювання measuring device

звужуючими narrowing

зчитування reading

клас точності accuracy class

колба bulb

комірки nucleus

конденсатозбірник condensate collection

лічильники counters

лобовій частині frontal part

мембранні коробки membrane boxes

метод вимірювання method of measuring

нагрітість heated

надійність reliability

номенклатура range

однорідний homogeneous

паличковий stick

пірометри pyrometers

повірка verification

покажчик designator

потоковипрямляч stream rectifier

принцип вимірювання principle of measurement

психрометри psychrometers

резервуар container

реперних точках fixed point

рівень pitch

роботоспроможність ability to work

робоча рідина working fluid

розмірність dimension

ротаметри VA meters

сильфони bellows

система одиниць system of units

слабоокислювальній poor oxidizing

сопла nozzle

спільні вимірювання сommon measurement

спостерігача beholder

сукупні вимірювання total measurement

сукупність totality

тахометричні tachometric

температурні шкали temperature scale

теплоємності heat capacity

термо-е.р.с. thermoelectric power

точність precision

турбінa turbine

турмалін tourmaline

чутливість sensitivity

швидкодія performance

шукане значення value required it