

ШЕСТА ГЛАВА

5.6. Измерване на температура

Температурата на телата е величина, характеризираща степента на нагрятост, която се определя от вътрешната кинетична енергия на топлинното движение на молекулите. Следователно температурата може да се разглежда като условна статистическа величина, правопрпорционална на средната кинетична енергия на молекулите на телата.

Температурата не може да бъде измерена непосредствено. Измерването ѝ практически е възможно по метода на сравнението на нагриване на две тела, при което за сравнение се използва определено физическо свойство, зависещо от температурата.

Веществото, което се избира за измерване на температура, се нарича термометрично вещество, а неговите параметри, по промените на които се съди за изменението на температурата, - термометрична величина, като термометрична величина могат да се използват различни физически величини, като: обем, налягане, електрическо съпротивление, линеен размер, термоелектрическо напрежение и др., които се изменят непрекъснато по даден закон.

Важно условие за температурните измервания е наличието на температурна скала. До създаването на термодинамичната скала /от Келвин през 1948 г./ температурните скали са строени, с малки изключения по един и същ начин - на две постоянни точки се присвоява определена числена стойност, а за ограничения по този интервал се приема, че термодинамичните свойства на веществото в термометъра са линейно свързани с температурата, t :

$$t = kE + D \quad , 3.6.1$$

където K е коефициент на пропорционалност;

E - термометрично свойство;

D - константа.

Опитът показва обаче, че с изменение на температурата коефициентът K се мени, при това различно за различните термометрични вещества. С този факт се обяснява защо термометрите с различни термометрични вещества с равномерна скала показват при температури различни от тези на основните точки, различни показания. Термодинамичната температурна скала по изтъкнатите причини става изходна за създаване на температурни скали, независещи от свойствата на термометричното вещество.

Термодинамичната скала е твърдествена на скалата на идеалния газ изградена на зависимостта на налягането на газа от температурата. Законите за изменение на налягането от температурата за реалните газове се отклоняват от тези за идеалните, но поправките за отклонението са малки и могат да бъдат определени с голяма

точност. Така, оценявайки разширението на реалните газове и въвеждайки поправки, може да се определи температурата по термодинамичната скала.

На базата на термодинамичната скала, VIII Генерална конференция по мерки и теглилки /1933 г./ въвежда Международната температурна скала /МТС/. Основни постоянни точки на МТС и присвоените им числови значения на температурата при нормално атмосферно налягане /101325 Pa/ са следните:

- точка на Кипене на кислорода – 182,97°C
- точка на топене на леда – 0,000°C
- точка на кипене на водата – 100,000°C
- точка на кипене на сярата – 444,60°C
- точка на втвърдяване на среброто – 960,5°C
- точка на втвърдяване на златото – 1063,0°C

В 1948 г. МТС била преразгледана и приведена в съответствие със състоянието на знанията в този момент. През 1960 г. Международният комитет по мерки и теглилки приема коригираните значения на температурната скала от 1948 г. и утвърждава т.н. Международна практическа температурна скала /МПТС/. Последната корекция е извършена през 1968 г. и скалата се означава с МПТС-68.

Температурата по МТС-68 се означава в Целзиеви градуси - °C. За термодинамичната скала на Келвин температурата се означава със символа Т, като числовото значение се придружава със знака - К.

Методите за измерване на температура се разделят на две групи: контактни и безконтактни. При контактните методи обмяната на енергия между средата и термометричното вещество става чрез топлопроводимост, а при безконтактните - чрез радиация и топлинно излъчване.

3.6.1. Контактни методи за измерване на температури.

От Контактните методи за измерване на температура в практиката са намерили приложение следните устройства: термоиндикатори, течностни стъклени термометри и манометрични термометри.

Термоиндикаторите са покрития, които притежават способността рязко да изменят цвета си при строго определена температура, наричана критична или температура на прехода.

Достойнствата на индикаторите, като средства за измерване на температури са следните; не са подложени на влиянието на статическо електричество; не изискват специална и скъпоструваща измервателна апаратура; позволяват да се измерва температурата в труднодостъпни повърхности практически с произволна форма, независимо от местоположението на детайла, включително и на движещи се с произволна скорост; могат да измерват температура на изделия, намиращи се под напрежение, под въздействието на високи и свръхвисоки честоти;

дават възможност да се измерва температура в неограничено число точки /измерване на температурни полета/.

Недостатък на контрола с термоиндикатори е, че се индикира температурата на преминал момент /след завършване на изпитанието/ и при това само максималното ѝ значение.

В течностните стъклени термометри измерването на температурата се основава на различния коефициент на топлинно разширение на течността и съда в който се намира.

Термометърът се състои от стъклен балон, капилярна тръбичка и запасен резервоар.

Термометричното вещество запълва резервоара, балона и частично капилярната тръба. Пространството в капилярната тръба над стълба течност трябва да се запълни с въздух или инертен газ, така че да не се достигне до кипене на течността, дори и при пределна температура. Температурата се отчита по височината на нивото в капилярната тръба.

Като термометрично вещество най-често се използва живак и етилов алкохол, а по-рядко пентон и толуол. Най-широко приложение са получили живачните стъклени термометри, които в сравнение с термометрите, запълнени с органична течност, имат значителни предимства по-голям обхват на измерване на температурата, в който живакът остава течен, живакът не мокри стъклото и др. При нормално атмосферно налягане живакът се намира в течно състояние от - 38 до 356°C, а с повишаване на налягането горната граница значително се повишава, като например при 20 МРа стига до 500°C. Известен недостатък на живака е малкият среден температурен коефициент на разширение $/0.18 \cdot 10^{-2} \text{K}^{-1}/$.

Стъклените термометри с органично термометрично вещество с малки изключения са предназначени предимно за измерване на ниски температури - от -100 до +60°C. Предимството им по отношение на живачните се изразява в близо 6 пъти по-голям температурен коефициент на разширение.

Стъклените течностни термометри, в зависимост от предназначението могат да бъдат разделени на следните групи: образцови /за предаване на МПТС от еталона на работните средства за измерване/; лабораторни /с повишена точност/ и със специално предназначение; технически /БДС 11055-73/ метеорологически, битови и др.

Като образцови се използват следните стъклени термометри /БДС 10248-72/: живачни термометри 1-ви разряд /от -55 до 0°C/ с максимално допустима грешка $\delta_{\text{доп}} = \pm 0.07 - 0.01 / ^\circ\text{C}$, живачни равноделни термометри 1-ви разряд /от 0 до + 600°C/ с $\delta_{\text{доп}} = \pm 0.002 - 0.2 / ^\circ\text{C}$; живачни /-30 - 0°C/ и живачно-талиеви /-55 - 0°C/ термометри 2-ри разряд с $\delta_{\text{доп}} = \pm 0.2 - 0.1 / ^\circ\text{C}$; 2-ро разрядни живачни $/0 \pm 630/$,

термометри с $\delta_{\text{доп}} = \pm/0.01 - 1/^{\circ}\text{C}$ и живачни термометри с променливо напълване /0 - 150 $^{\circ}\text{C}$ / с $\delta_{\text{доп}} = \pm/0.004 - 0.1/^{\circ}\text{C}$; треторазрядни термометри /0 - 630 $^{\circ}\text{C}$ / с $\delta_{\text{доп}} = \pm/0.1-3/^{\circ}\text{C}$.

В зависимост от изпълнението на скалата се различават пръчковидни и термометри с вложена скала.

В зависимост от формата на долната им част се различават прави и ъглови термометри. Размерите на стъклените технически термометри, прави и ъглови, са регламентирани от БДС 11055-73.

Техническите термометри се градуират и проверяват при потапяне на цялата им долна част, ето защо при измервания в експлоатационни условия термометърът трябва да бъде потопен на същата дълбочина. В противен случай в показанията трябва да се внесе корекция.

Ако термометърът е градуиран за пълно потапяне, а се използва за частично потапяне, то поправката за непотопяемия стълб се изчислява по формулата

$$K_F = n\gamma(t_{\text{ТП}} - t_F) \quad ,3.6.2.$$

където n е дължината на непотопяемия стълб, mm; γ - коефициент на относително топлинно разширение на термометричната течност; $t_{\text{ТП}}$ - действителна стойност на температурата; t_F - средна температура на непотопяемия стълб.

Ако термометърът е градуиран при частично потапяне той се използва при предвидената дълбочина на потапяне и ако средната температура на потопения стълб t_F'' / се отличава от номиналната температура t_F' / посочена от термометъра, то поправката на непотопения съд се изчислява по формулата

$$K_F = n\gamma(t_F' - t_F'') \quad , 3.6.3.$$

Посочените поправки имат още по-голямо значение при термометрите с органична термометрична течност.

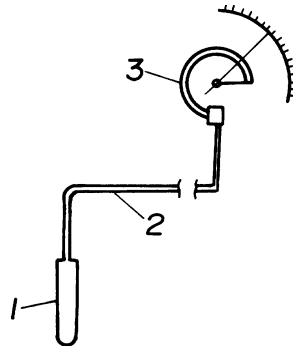
Принципът на действие на манометричните термометри се основава на зависимостта на налягането /или обема/ на работното вещество в затворена система от температурата.

Затворената система на уреда се състои от термоприемник /фиг. 3.6.1/ капилярна тръбичка 2 и манометрична пружина 3, която посредством лостова система въздейства на стрелката /или писеца/.

В зависимост от вида на работното вещество, запълващо термоприемника, манометричните термометри се подразделят /БДС 10712-73/ на:

1. Газови, в които цялата измерителна система е запълнена с инертен газ.
2. Течности, в които измерителната система е запълнена с течност.
3. Паротечностни, в които термобалонът е запълнен частично с течност с ниска температура на кипене и частично с нейните наситени пари, а

капилярът и манометърът - с наситени пари на течността или със специална разделителна течност.



Фиг.3.6.1. Манометричен термометър

Предимство на манометричните термометри е сравнително простата им конструкция, възможността за дистанционно измерване на температурата и възможността за регистрация на техните показания.

Недостатък на манометричните термометри са сравнително ниската им точност на измерване, относително късото разстояние на дистанционното предаване на данните, трудният ремонт при разгерметизиране на системата.

В газовите манометрични термометри като термометрично вещество се използва азот, в течностите термометри – живак, по-рядко се използват органични течности, като метилов спирт и ксилол. В паротечностните, разнообразието е по-голямо – хлорметил, ацетон, бензол и др. Като буферна течност при тях се използва най-често глицерин в смес с метилов алкохол или вода.

Измерителната система при течностните термометри се запълва с термометрично вещество под налягане, с цел да се намали грешката от изменението на хидростатичното налягане на течността.

Върху показанията на течностните манометрични термометри по-голямо влияние оказва изменението на температурата на околната среда. За намаляване на температурната грешка в различните конструкции термометри са взети различни мерки като увеличаване на обема на термобалона, намаляване на сечението на капиляра, използване на специални компенсационни системи и др.

В паротечностните манометрични термометри е възможна появата на следните грешки - хидростатична /също както при течностните/ и барометрична, в резултат на колебанието на атмосферното налягане. Тук температурната грешка е незначителна, поради преразпределението между течната и парната фаза, без съществено да се изменя налягането от температурата на околната среда.

Температурната грешка в газовите термометри от изменението на температурата на околната среда е най-голяма. За да се намали тази грешка, увеличават се размерите на термобалона и се намалява сечението на капиляра.

Практически само скалата на паротечностните термометри е неравномерна, в следствие на нелинейното съотношение между температурата на кипене и налягането в системата.

3.6.2. Безконтактни методи за измерване на температура.

Безконтактните методи за измерване на температура се основават на законите на топлинното излъчване на телата.

Нагретите тела излъчват лъчиста енергия във вид на електромагнитни вълни с различна дължина. При сравнително ниски температури, до 500°C, основно се излъчват инфрачервените лъчи. С увеличаването на температурата, цветът на телата се изменя, от тъмно червен до бял, съдържащ всички вълни на видимия спектър.

От безконтактните методи за измерване на температури най-голямо практическо приложение имат методите, в основата на които са залежали законите за топлинно излъчване на абсолютно черно тяло. Това е такова тяло, което поглъща целия насочен към него радиационен поток и съответно излъчва при дадена температура максимална енергия. Уредите разработени въз основа на безконтактните методи за измерване на температури, се наричат пирометри. В пирометрията, като параметър, характеризиращ топлинното излъчване на телата, се приема енергетичната светлина /излъченост/ и енергетичната яркост /лъчистост/.

Под пълна енергетична светлинност на нагретите тела се разбира пълната /интегрална/ повърхност на потока лъчиста енергия, т.е.

$$E(T) = \int_0^{\infty} E(\lambda, T) d\lambda \quad , 3.6.4.$$

където $E(T)$ е пълната енергетична светлинност при температура T , W/m^2 ; λ - дължина на светлинната вълна, m ; $E/\lambda, T$ - спектрална енергетична светлинност, W/m^3 .

Енергетичната яркост на телата в дадено направление се нарича мощността на излъчване на площ с единица лице, нормална на посоката, в която се разглежда лъчението.

$$J(T) = \int_0^{\infty} J(\lambda, T) d\lambda \quad , 3.6.5.$$

където $J(T)$ е пълната енергетична яркост при температура T ; $J(\lambda, T)$ - спектралната енергетична яркост.

Енергетичната яркост е основен параметър, непосредствено възприеман от човешкото око, а също от всички пирометри, измерващи температурата по топлинното излъчване.

Всички реални тела по степента на поглъщане на лъчистата енергия се различават от черното тяло и имат коефициент на поглъщане по-малък от единица. Излъчващата способност на реалните тела също се различава от тази на абсолютно черното тяло и може да бъде характеризирана с пълен или спектрален коефициент на излъчване.

Пълният коефициент на излъчване ε_T е мярка, определяща частта от пълната енергия на абсолютно черно тяло, което излъчва реалното тяло, т.е.

$$\varepsilon_T = \frac{E(T)}{E_o(T)}, \quad 5.6.6.$$

Аналогично може да се формулира спектралния коефициент на излъчване, но за определена дължина на вълната на излъчване.

Коефициентите на излъчване ε_T и ε_λ зависят от веществото на телата, състоянието на тяхната повърхност и температурата им. Тъй като излъчвателната способност зависи от индивидуалните особености на реалните тела, необходимо е пирометрите да се градуират по излъчването на абсолютно черно тяло. Използвайки пирометрите за измерване на температурата на реални тела, ние получаваме стойности на температурите различни от действителната температура на даденото тяло. Тези температури са условни.

Температурите на нагретите тела по безконтактния метод се измерват в три направления: интегрално излъчване /радиационен метод/; монохроматично излъчване /яркостен метод/ и цветови метод.

По-голямо приложение са намерили първите два метода, докато третият метод е с ограничено приложение.

3.6.3. Радиационни пирометри

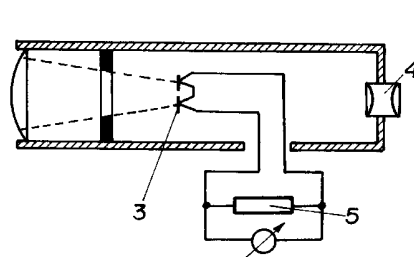
В пирометрите от този тип, пълната мощност на излъчване се възприема от топлочувствителни елементи /обикновено термоматерии/ предварително градуирани по излъчването на абсолютно черно тяло. Поради това, тези уреди се наричат още и пирометри на пълното излъчване. Излъчваната топлинна енергия се възприема и фокусира върху чувствителния елемент от оптическа система. Фокусирането може да стане както с леща, така и със събирателно вдлъбнато огледало.

В качеството на преобразуватели на температурата в електрически сигнали, в радиационните пирометри се използват термодвойки терморезистори, фотопреобразуватели и други.

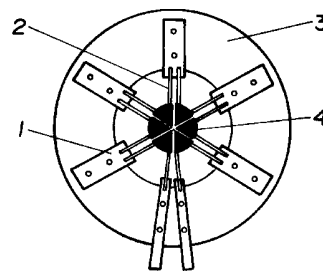
Най-често се използват термодвойки, като за по-голяма чувствителност те се свързват последователно в обща верига.

Опростена схема на радиационен пирометър е показана на фиг. 3.6.2. Пирометърът се състои от оптична система с първичен преобразувател и измерителен уред. Получената от обекта на измерване лъчиста енергия се насочва от обектива 1 към плоскостта, в която лежат работните краища на термодвойките от термобатерията. За насочване на лъчите към работната повърхност на преобразувателя се поставя и блендата 2. Окулярът 4 се използва за насочване на оптичната система и преобразувателя към точката от обекта, чиято температура трябва да бъде измервана. Резисторът 5, шунтиращ термобатерията, е предназначен за компенсиране на грешката от промяна на температурата на неработните краища на термодвойките. Той се изработва от меден проводник. Като преобразувател се използва батерия от термодвойка звездообразен тип /фиг. 3.6.3/. – Горещите спойки на термодвойките 2 са изработени като сектори, а свободните краища се заваряват към пластинките 1, свързани чрез пръстена 3. Температурата на свободните краища на термодвойките е близка до тази на корпуса.

Радиационните пирометри се използват за измерване на температури от 100 до 4000° С.



фиг.3.6.2. Радиационен пирометър



Фиг.3.6.4. Термобатерия

В металургичната промишленост намират приложение още и пирометрите за спектрално отношение. Те се основават на метода за сравняване на интензивността на излъчване на две дължини на вълните в границите на видимия спектър.

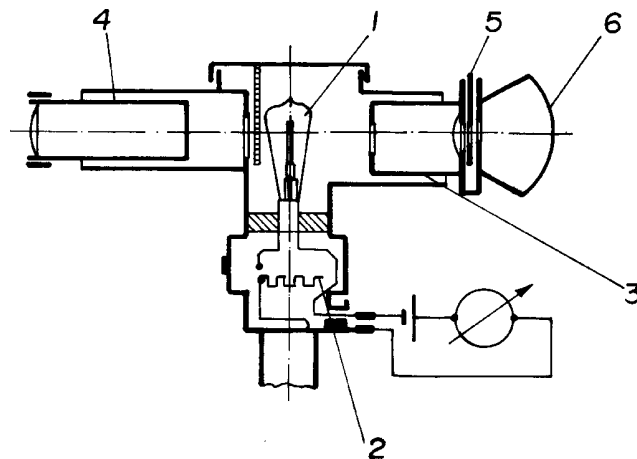
3.6.4. Яркостни пирометри.

При яркостните пирометри се използва принципът на сравнение на интензивността на излъчване на изследваното тяло с интензивността на излъчване на източник, предварително градуиран по излъчването на абсолютно черно тяло.

Най-голямо приложение са намерили яркостните пирометри с променлива яркост на еталонния излъчвател /фиг.3.6.4./. При този пирометър яркостта на изследвания обект се сравнява с яркостта на нишката от еталонната лампа 1. Яркостта във всички точки на нишката е еднаква и може да се регулира чрез реостата 2.

Обективът 6 се насочва към изследвания обект така, че изображението на нагрятото тяло и нишката на фотометричната лампа да се получат в една плоскост.

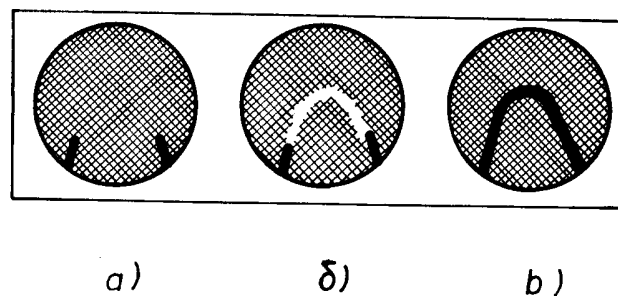
За осъществяването на тази операция способствуват помощният обектив 3 и окулярът 4. Филтърът 5 пропуска светлинни лъчи с определена дължина, по-голяма от $0.62 \mu\text{m}$.



Фиг.3.6.4. Яркостен пирометър.

Чрез изменение на захранващия ток на фотометричната лампа се получава съвпадение между яркостите на нишката и изследвания обект. При това съвпадение в окуляра на пирометъра се наблюдава картината показана на фиг. 3.6.5.a. Положение "б" съответствува на по-голяма яркост на нишката, а положение "в" - на по-голяма яркост на изследвания обект.

С помощта на яркостните пирометри могат да се измерват температури от 800 до $10\,000^\circ\text{C}$. Като недостатъци на тези пирометри могат да се посочат субективността при оценка на резултатите от измерванията и липсата на възможност за записване на показанията и предаването им на разстояние.



фиг. 3.6.5. Екран на пирометър.