

ЗМІСТ

1 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	4
1.1 ЗАДАЧІ ПО ВИЗНАЧЕННЮ ТЕМПЕРАТУРИ	11
2 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ	13
2.1 ЗАДАЧІ ПО ВИЗНАЧЕННЮ ТИСКУ	15
3 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ	16
3.1 ЗАДАЧІ ПО РОЗРАХУНКУ ВИТРАТИ	19
4 ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ	21
4.1 ЗАДАЧІ ПО ВИЗНАЧЕННЮ РІВНЯ	23
5 АНАЛІЗ СКЛАДУ СЕРЕДОВИЩ	24
5.1 ЗАДАЧІ ПО ВИЗНАЧЕННЮ АНАЛІЗУ СКЛАДУ	28
СЕРЕДОВИЩ	
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	30
ДОДАТОК 1 - Термоелектричні перетворювачі	31

1 ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Вимірювання температури може здійснюватися різними методами. Кожен метод має свої особливості обумовлені як принципом, так і застосовуваними засобами й схемами їхнього підключення. Крім того, при вимірі температури варто враховувати взаємодію між термоперетворювачами й вимірюваним середовищем.

Контактні перетворювачі перебувають у безпосередньому контакті із середовищем, температуру якого вони вимірюють. Часто власна температура контактного термоперетворювача (або його частини) навіть у статичному режимі відрізняється від температури вимірюваного середовища. Ця відмінність визначається особливостями теплообміну між термоперетворювачем і вимірюваним середовищем, конструктивними й теплофізичними характеристиками самого термоперетворювача й окремих частин його арматур, а також умовами теплообміну термоперетворювача з навколишнім середовищем.

Показання рідинних і манометричних термометрів розширення визначаються температурою не тільки робочої речовини, що перебуває в безпосередньому контакті з вимірюваним середовищем, але й виступаючої частини робочої речовини, що не контактує, яка перебуває в теплообміні з навколишнім середовищем. Якщо конструкцією або умовами експлуатації передбачена наявність частина, яка не контактує з вимірюваним середовищем, то градування такого термометра повинне проводитися при певній температурі виступаючої частини. Зміна температури виступаючої частини відносно градувального значення викличе зміну показань термометра.

Зміна показань манометричних термометрів можлива також за рахунок зміни тиску незалежно від значення температури. Наприклад, одним з таких факторів може бути різниця рівнів між термобалоном і манометром для рідинних манометричних термометрів. Зміна показань виникає при зміні

барометричного тиску, тому що манометр, який використовується у манометричних термометрах, вимірює надлишковий тиск.

При вимірі термо-ЕРС можуть мати місце помилки в оцінці дійсного значення термо-ЕРС термоелектричного термометра, які викликаються неврахуванням деяких властивостей термоелектричних ланцюгів, а також неправильною оцінкою температури вільних кінців або неврахуванням властивостей термоелектронних дротів, що подовжують.

Нагадаємо деякі із цих властивостей. Термо-ЕРС ланцюга не зміниться при включенні у нього провідника з будь-якого матеріалу, якщо температура місць підключення однакова. Термоелектричні дроти, що подовжують служать для подовження термометра без перекручування термо-ЕРС, що ним розвивається.

Вільними називаються ті кінці термоелектричного термометра, які включаються у вимірювальний ланцюг. Якщо термоелектричний термометр подовжений термоелектродними дротами, то вільними кінцями термометра будуть кінці термоелектронних дротів.

Термоелектродні дроти, що подовжують, вносять свою частку в загальну похибку виміру. Наприклад, межа основної припустимої похибки дротів, що подовжують для термоелектричних термометрів типу К дорівнює $\pm 0,16$ мВ.

У відповідності зі стандартом СЭВ 1059-78 [1], будуть застосовуватися дев'ять типів термоелектричних перетворювачів. Типи цих термоелектричних перетворювачів й їхні позначення наведені в додатку 1.

Для одних типів термопар (мідь - копелева, хромель - копелева, вольфрамрений – вольфрамренийовий ВР 5/20-1) залишилися колишні назви й градувальні характеристики, ніяких позначень для цих термопар стандарт СЭВ не встановлює. Для інших типів уведено нові назви й позначення; нікель-хром — нікель-алюмінієва термопара, тип К, колишня назва хромель-алюмелева й позначення ХА, градувальна характеристика залишилася незмінною. Для термопар платинородій-платинових і платинородій-

платинородієвих змінюються позначення (замість ПП уводиться S, а замість ПР — В) і змінюються градуювальні характеристики. Відхилення вимірюваних значень, що допускаються, термоелектрорушійної сили, мВ, від градуювальних характеристик, наведених у Додатку (табл. П.6 — П.14) [2], визначаються з вираження

$$\Delta e = \pm[a + b(t - c)]S_T, \quad (1.1)$$

де t — температура робочого кінця термометра, °С; $S_T = (de/dt)_T$ — коефіцієнт перетворення термометра, який визначається на основі його градуювальної характеристики; a, b, c — коефіцієнти, які визначаються з додатка 1.

У задачах по потенціометричним схемам у першу чергу варто чітко зрозуміти фізичний зміст компенсаційного методу вимірів: термо-ЕРС термоелектричного термометра дорівнює за значенням і протилежна за знаком різниці потенціалів на ділянці, що компенсує, вимірювальної схеми потенціометра. Математичне вираження рівноваги потенціометричної схеми виміру легко одержати, використовуючи другий закон Кірхгофа для замкнутої ділянки вимірювальної схеми, що включає термометр і підсилювач.

У задачах по електричних термометрах опору варто звернути увагу на всі особливості, пов'язані з роботою термометрів опору й вимірювальні схеми. Тому що значення температури визначається за значенням опору чутливого елемента термометра, то можуть мати місце помилки у визначенні цього опору. Ці помилки викликаються зміною опору або ліній зв'язку, або чутливого елемента за рахунок самонагрівання, або іншими причинами, які змінюють опір термометра незалежно від значення температури вимірюваного середовища.

Типи термоперетворювачів опору, позначення їх градуювальних і діапазони вимірюваних температур наведені в табл. П.15 [2]. Градуювальні характеристики термоперетворювачів опору наведені в табл. П.18 — П.23 [2].

Для мідних термоперетворювачів ця залежність в інтервалі температур $-50 \div +200$ °C може бути виражена як

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot t), \quad (1.2)$$

де $\alpha = 4,28 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$.

Для платинових термоперетворювачів ця залежність досить складна й на різних інтервалах апроксимується різними вираженнями.

Залежність опору напівпровідникових термометрів від температури має вигляд

$$R_t = R_0 \exp\left[\frac{B(293 - T)}{293 \cdot T}\right], \quad (1.3)$$

де T — поточне значення температури, К; R_0 — значення опору при температурі $T = 293$ К; B — коефіцієнт, що залежить від властивостей напівпровідникового матеріалу.

При вимірі температури контактними термоперетворювачем можуть виникнути значні похибки, обумовлені відводом теплоти від чутливого елемента за рахунок тепловіддачі по чохлах й тепловідведення випромінюванням.

Похибка Δt виміру температури газу, викликана променистим теплообміном між чохлами термоперетворювача й стінкою труби, визначається з вираження

$$\Delta t = T_T - T_C = -\frac{C_0 \cdot \varepsilon_{\text{пр}}}{\alpha_K} \left[\left(\frac{T_T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{СТ}}}{100} \right)^4 \right], \quad (1.4)$$

де $T_C, T_T, T_{\text{СТ}}$ — відповідно температура вимірюваного середовища, термоперетворювача й стінки, К; α_K — коефіцієнт тепловіддачі конвекцією між термоперетворювачем і вимірюваним середовищем, Вт/(м²·К); $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) — коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведений коефіцієнт теплового випромінювання, що характеризує теплообмін між термоперетворювачем і стінкою.

Коли поверхня стінки значно більше поверхні термоперетворювача ($F_{\text{ст}} \gg F_{\text{Т}}$), можна вважати, що приведений коефіцієнт теплового випромінювання практично дорівнює коефіцієнту теплового випромінювання термоперетворювача ($\varepsilon_{\text{пр}} = \varepsilon_{\text{Т}}$).

Похибка Δt виміру температури за рахунок тепловідведення по чохла визначається по формулі

$$\Delta t = t_{\text{Т}} - t_{\text{с}} = -\frac{t_{\text{Т}} - t_{\text{с}}}{ch l \sqrt{\frac{p \cdot \alpha}{\lambda \cdot S}}}, \quad (1.5)$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі між термоперетворювачем і вимірюваним середовищем, Вт/(м²·К); p й S — периметр, м, і площа, м², поперечного перерізу чохла термоперетворювача; λ — коефіцієнт теплопровідності матеріалу термоперетворювача, Вт/(м·К); l — глибина занурення чохла у вимірюване середовище, м.

При вимірі температури високошвидкісних газових потоків виникає похибка, яка викликана гальмуванням потоку.

Зв'язок між статичною (або термодинамічної) температурою потоку $T_{\text{с}}$ й температурою гальмування T^* , що приймає потік при повному його адіабатному гальмуванні, виражається формулою

$$T^* - T_{\text{с}} = v^2 / 2c_p, \quad (1.6)$$

де v - швидкість руху потоку, м/с; c_p - питома теплоємність газу при постійному тиску, Дж/(кг·К).

У задачах, пов'язаних з тепловою інерцією термоперетворювача, коефіцієнт тепловіддачі за час перехідного процесу вважається незмінним, а сам процес описується рівнянням першого порядку

$$T_{\text{д}} \frac{dt_{\text{T}}}{d\tau} + t_{\text{T}} = t_{\text{с}}, \quad (1.7)$$

де t_{T} — поточне значення температури термоперетворювача, що відповідає часу τ після стрибкоподібної зміни температури середовища до значення $t_{\text{с}}$; $T_{\text{д}}$ — постійна часу, с.

Теплова інерція викликає появу динамічної похибки, що являє собою різницю поточного значення температури термоперетворювача t_{T} й температури середовища $t_{\text{с}}$.

При рішенні задач по пірометрах випромінювання варто керуватися математичним вираженням фізичних законів, що становлять основу принципу дії пірометра. Одним з основних законів є закон Планка, що встановлює залежність спектральної енергетичної яскравості абсолютно чорного тіла від його температури [3]:

$$B_{0\lambda T} = \frac{C_1}{\lambda^5} \left(e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)^{-1}, \quad (1.8)$$

де λ — довжина хвилі, м; T — температура тіла, К; $C_1 = 1,191 \cdot 10^{-16}$ Вт·м²/ср; $C_2 = 1,438 \cdot 10^{-2}$ м·К.

Для видимої ділянки спектра й $t < 3000$ К можна замість закону Планка використати формулу Вина

$$B_{0\lambda T} = C_1 \cdot \lambda^{-5} \cdot e^{-\frac{C_2}{\lambda T}}. \quad (1.9)$$

Інтегральна енергетична яскравість визначається законом Стефана - Больцмана, що для абсолютно чорного тіла має вигляд

$$B_{0T} = \sigma \cdot T^4, \quad (1.10)$$

де σ — постійна, яка дорівнює $1,805 \cdot 10^{-8}$ Вт/(ср·м²·К⁴).

Енергетична яскравість реальних фізичних тіл менше яскравості абсолютно чорного тіла. Спектральна енергетична яскравість реального тіла пов'язана з яскравістю абсолютно чорного тіла вираженням

$$B_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T} \cdot B_{0\lambda T}, \quad (1.11)$$

де $\varepsilon_{\lambda T}$ — монохроматичний коефіцієнт теплового випромінювання при температурі T .

Інтегральну енергетичну яскравість реального тіла можна визначити з вираження

$$B_T = \varepsilon_T \cdot B_{0T}, \quad (1.12)$$

де ε_T — інтегральний коефіцієнт теплового випромінювання при температурі T .

На законах випромінювання ґрунтується ряд безконтактних методів виміру температури. Найбільше поширення одержали наступні методи виміру температури по випромінюванню:

- квазімонохроматичний (яскравістний) метод, що використовує залежність спектральної енергетичної яскравості тіла від температури;
- метод спектрального відношення (колірний), заснований на перерозподілі з температурою спектральних енергетичних яскравостей усередині даної ділянки спектра (відношення двох спектральних енергетичних яскравостей);
- метод повного випромінювання (радіаційний), заснований на залежності енергетичної яскравості тіла від температури в широкому спектральному інтервалі.

1.1 ЗАДАЧІ ПО ВИЗНАЧЕННЮ ТЕМПЕРАТУРИ

Задача 1.1.1. Лабораторний скляний термометр, який заповнений пентаном, показує по шкалі $(-50)^\circ\text{C}$. Термометр занурений у вимірюване середовище до відмітки $(-120)^\circ\text{C}$. Температура стовпчика, що виступає складає 25°C . Коефіцієнт об'ємного теплового розширення пентану у склі складає $\gamma = 0,0012\text{ K}^{-1}$.

Задача 1.1.2. Визначте зміну показів манометричного ртутного термометра, якщо при градуюванні термобалон та прилад, що показує знаходилися на одному рівні, а в реальних умовах прилад, що показує розташований на 10 м вище, ніж термобалон. Шкала термометра $0 - 400^\circ\text{C}$. При зміні температури від 0°C до 400°C тиск у системі змінюється від 5,69 МПа до 17,33 МПа. Густина ртуті $\rho = 13595\text{ кг/м}^3$.

Задача 1.1.3. Визначте зміну показань манометричного газового термометра, яка викликана збільшенням температури капіляру на 50°C і температури пружини на 20°C при наступних умовах: об'єм капіляру $V_{\text{к}} = 2,5\text{ см}^3$, об'єм манометричної пружини $V_{\text{п}} = 1,9\text{ см}^3$, об'єм термобалону $V_{\text{б}} = 165\text{ см}^3$.

Задача 1.1.4. Температура газового потоку постійна і має значення зверх 2750°C . Контактний малоінерційний термоелектричний термометр на частку секунди був поміщений у газовий потік і негайно видалений з нього, не нагрівшись до температури потоку.

Під час знаходження термометру у газовому потоці було виміряне значення його температури і були визначені перша та друга похідні для цього ж моменту часу τ_1 .

Диференціальне рівняння термометру має наступний вигляд

$$T_{\text{д}} \frac{dt_{\text{Т}}}{d\tau} + t_{\text{Т}} = t_{\text{с}},$$

де t_T — температура термометра, °C; t_c — температура середовища, °C; T_d — постійна часу термометра.

Визначте температуру середовища, якщо відомо, що у момент часу $\tau = \tau_1$

$$t_T(\tau_1) = 657 \text{ °C}; \left[\frac{dt_T}{d\tau} \right]_{\tau=\tau_1} = 669 \text{ °C/c}; \left[\frac{d^2t_T}{d\tau^2} \right]_{\tau=\tau_1} = -200 \left(\text{°C/c} \right)^2.$$

Задача 1.1.5. Визначте температуру розплавлено металу, якщо відомо, що температура термоелектричного термометру через 0,5 с після занурення у метал склала $t_1 = 708 \text{ °C}$, через 1 с після занурення $t_2 = 1080 \text{ °C}$ і через 1,5 с $t_3 = 1300 \text{ °C}$. Регулярний тепловий режим нагріву термометра настає через 0,3 с після занурення його у метал, і коефіцієнти рівняння не залежать від температури середовища.

Задача 1.1.6. Температура газоходу вимірюється квазімонохроматичним (оптичним) пірометром. Стрілка пірометра показує температуру 1100 °C . Визначте дійсну температуру газоходу і систематичну похибку виміру температури стінки, якщо коефіцієнт теплового випромінювання її складає $\varepsilon_\lambda = 0,75$. Ефективна довжина хвилі пірометра $\lambda_e = 0,65 \text{ мкм}$.

Задача 1.1.7. Необхідно визначити похибку прямого вимірювання температури вимірювальним пристроєм, який складається з термоелектричного перетворювача хромель-алюмелевого (ТХА), термоелектричних дротів, що подовжують, коробки холодних спаїв КТ, мілівольтметра М – 64, температура вільних кінців ТХА — 20 °C , показання мілівольтметра 540 °C , шкала мілівольтметра $200 \dots 600 \text{ °C}$, клас точності 0,5.

Задача 1.1.8. Термоперетворювач (термопара) встановлений в газоході, який футерований вогнетривкою цеглою. Температура, яку показує термометр, $t_T = 1100 \text{ °C}$, а температура стінки $t_{cT} = 1030 \text{ °C}$. Коефіцієнт тепловіддачі від газового потоку до термоперетворювача $\alpha_K = 375 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$.

Коефіцієнт теплоти чохла термоперетворювача $E_T = 0,5$. Вважаючи газ промінепрозорим визначте похибку виміру, викликану променевим теплообміном. Як зміниться ця похибка, якщо температура стінки підвищиться на 5 % за рахунок покращення ізоляції газоходу? Визначте, як зміниться похибка виміру температури газу, якщо зробити екранування термоперетворювача. Температура стінки вважається заданою. Приведений коефіцієнт теплоти системи термоперетворювач — екран $E_{Te} = 0,65$; коефіцієнт чорноти екрану $E_e = 0,78$; коефіцієнт тепловіддачі від газового потоку до екрану $\alpha_{ке} = 355 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

2 ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

Одиницею виміру тиску в Міжнародній системі одиниць (СІ) є паскаль (Па). Однак дотепер застосовуються також прилади, які відградуєвані у $\text{кгс}/\text{см}^2$, мм. вод. ст., мм. рт. ст. і барах. Між цими одиницями й паскалем мають місце наступні співвідношення: $1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 98066,5 \text{ Па}$; $1 \text{ мм. вод. ст.} = 9,80665 \text{ Па}$; $1 \text{ мм. рт. ст.} = 133,322 \text{ Па}$; $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$.

Для виміру тиску й різниці тисків найбільше поширення одержали різні види рідинних і пружинних (із пружним чутливим елементом) приладів.

У рідинних приладах вимірюваний тиск (різниця тисків) урівноважується тиском стовпа рідини (різницею тисків стовпів рідини). Тиск стовпа рідини визначається висотою стовпа, густиною й прискоренням вільного падіння, тому похибки виміру тиску рідинними манометрами пов'язані з похибками виміру висоти стовпа рідини, точністю визначення густини, що залежить від температури, і прискорення вільного падіння, обумовленого географічною широтою й висотою над рівнем моря.

Для рішення задач, які пов'язані з виміром тиску, досить відомостей, які представлені в [3]. Основною формулою для рідинних приладів тиску є формула, що встановлює залежність між вимірюваним надлишковим тиском

або перепадом тисків Δp , густиною рідини ρ , що заповнює, і різницею її рівнів h в обох посудинах приладу:

$$\Delta p = h \cdot \rho \cdot g. \quad (2.1)$$

Із цієї формули легко можуть бути отримані вираження для похибок виміру, викликаних помилками відліку h або відхиленням ρ й g від значень, прийнятих при градуюванні. При рішенні задач варто уважно стежити за одиницями отриманих величин, наприклад, якщо у вищенаведену формулу підставити h у м, ρ , у кг/м^3 , g у м/с^2 , то Δp буде в Па.

В пружинних приладах тиск визначається по деформації пружних чутливих елементів або силі, що розвивається ними. На показання пружинних приладів може впливати температура навколишнього середовища, що викликає зміну властивостей чутливого елемента й передавального механізму. Велике поширення одержали прилади для виміру тиску з уніфікованим вихідним сигналом, що працюють за принципом компенсації зусиль. Прилади цього типу застосовуються для виміру тиску, розрідження, вакууму й різниці, тисків у широкому діапазоні значень вимірюваного параметра.

При рішенні задач по приладах із силовою компенсацією варто чітко представляти, що в статичному режимі в кінематичній схемі цих приладів відбувається зрівноважування зусилля, що розвивається чутливим елементом, зусиллям, що діють на цей елемент із боку пристрою зворотного зв'язку (електричного або пневматичного). Ці зусилля легко можуть бути розраховані по відомих зусиллям, що розвиваються окремими елементами, і співвідношенню плечей. У цей час практично всі прилади, що випускаються із силовою компенсацією мають уніфікований вихідний сигнал (електричний або пневматичний).

2.1 ЗАДАЧІ ПО ВИЗНАЧЕННЮ ТИСКУ

Задача 2.1.1. У U-образному манометрі з водяним заповненням внутрішні діаметри трубок відповідно дорівнюють 10 і 12,6 мм. При вимірюванні тиску рівень в першій трубці перемістився на 356 мм. Тиск, який вимірюється, дорівнював 6,2 кПа. Оцініть похибку, яка викликається неврахуванням реального рівня у другій трубці.

Задача 2.1.3. Розрахуйте, яким повинно бути співвідношення між діаметрами плюсової та мінусової ємкості чашкового манометра, щоб при підрахунку рівня рідини тільки в мінусовій ємності похибка виміру різниці тиску не перевищувала 0,1 %.

Задача 2.1.3. Чи зміниться ціна поділки чашкового манометра, якщо весь простір над ртуттю у трубці та посуді залито водою? Температура дифманометра та вимірюваного середовища складає 30 °С. Діаметр мінусової трубки 6 мм, діаметр плюсової ємності – 60 мм (рисунок 2.1). Поділки на шкалі нанесені через 1 мм.

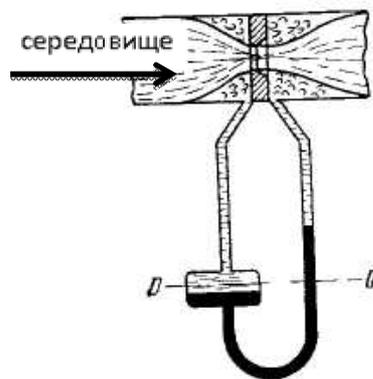


Рисунок 2.1

Задача 2.1.4. Манометр, який вимірює тиск пари, встановлений на 7 м нижче точки відбору. Манометр показує $p = 7$ МПа, середнє значення температури конденсату в імпульсній лінії $t = 78$ °С. Визначте дійсне значення тиску в паропроводі.

Задача 2.1.5. Якою повинна бути жорсткість пружини у дзвоновому дифманометрі з пружинним зрівноваженням, щоб зміна перепаду тиску від 0 до 1,6 кПа викликало переміщення дзвона на 4 мм? Діаметр дзвону 50 мм.

Задача 2.1.6. Розрахуйте вагу вантажу, що зрівноважує, кільцевого дифманометру з діапазоном виміру 0 – 4 кПа. Середній діаметр кільця 150 мм, перетин кільця $13,6 \text{ см}^2$, відстань від вісі обертання кільця до центру тяжіння вантажів 73 мм. Максимальний кут повороту 50° .

Задача 2.1.7. Визначте ціну поділки чашкового манометра в одиницях тиску, якщо він заповнений ртуттю. Діаметр мінусової трубки 6 мм, діаметр плюсової ємкості 60 мм. Поділки на шкалі нанесені через 1 мм. Умови виміру: $t = 0^\circ \text{C}$; $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$.

Задача 2.1.8. У дзвоновому дифманометрі (рисунок 2.2) з тонкими стінками зрівноваження дзвону відбувається за рахунок деформації пружини (силою рідини, що виштовхує, можна знехтувати).

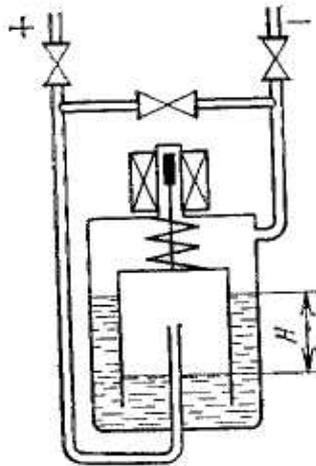


Рисунок 2.2

Чи зміниться коефіцієнт перетворення дифманометра, якщо збільшити вагу дзвону при незмінній лінійній характеристиці пружини?

3 ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

Витрата рідин, газів і пари є одним з важливих показників багатьох технологічних процесів. Практично всі методи виміру витрати, які застосовуються в промислових і лабораторних установках, досить докладно розглянуті в [4]. Відзначимо деякі особливості найпоширеніших методів виміру витрати.

Перепад тиску Δp , що утвориться в комбінованій напірній трубці, дорівнює динамічному напору. Швидкість v , що відповідає цьому перепаду, визначається з рівняння

$$v = k_T \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}, \quad (3.1)$$

де k_T — коефіцієнт трубки (для правильно виготовлених трубок близький до одиниці).

Напірні трубки вимірюють швидкість у конкретній точці перетину потоку. Тому для визначення витрати необхідно знати співвідношення між місцевою швидкістю v й середньою швидкістю v_c , що визначається розподілом швидкостей по перетині трубопроводу. При вісесиметричному потоці розподіл швидкостей визначається числом Рейнольдса Re і ступенем шорсткості труби. Установлено [4], що в широкому діапазоні чисел Re від $4 \cdot 10^3$ до $3 \cdot 10^6$ $v/v_c = 1 \pm 0,005$ на відстані $0,762 R$ від центру труби. При ламінарному режимі це відношення має місце на відстані $0,707 R$ від центру труби, де R — радіус труби.

У цей час найпоширенішим у промисловості методом є вимір витрати за допомогою пристроїв, що звужують.

Взаємозв'язок між об'ємною Q_0 або масовою Q_M витратами й перепадом Δp на пристрої, що звужує, визначається рівняннями витрати:

$$Q_0 = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta p}; \quad (3.2)$$

$$Q_M = \alpha \cdot \varepsilon \cdot F_0 \sqrt{2 \cdot \rho \cdot \Delta p}, \quad (3.3)$$

де F_0 — площа отвору пристрою, що звужує, м³; ρ — густина вимірюваного середовища перед пристроєм, що звужує, кг/м³; α — коефіцієнт витрати; ε — поправочний множник на розширення вимірюваного середовища.

Коефіцієнт витрати α залежить від відносної площі (модуля) пристрою, що звужує, m і числа Рейнольдса Re . При $Re \succ Re_{гр}$ α слабо залежить від Re й в основному визначається значенням m . Дійсний коефіцієнт витрати α визначається через вихідний α_B по формулі (для промислових витратомірів)

$$\alpha = \alpha_B \cdot k_{ш} \cdot k_{п}, \quad (3.4)$$

де $k_{ш}$ — поправочний множник на шорсткість трубопроводу; $k_{п}$ — поправочний множник на притуплення вхідної крайки діафрагми (для сопел $k_{п} = 0$).

При використанні цього методу виміру часто мають місце похибки, викликані невідповідністю розрахункових і дійсних значень параметрів у рівняннях витрати. Наприклад, при відхиленні температури середовища t від розрахункової t_p змінюється густина середовища, що викликає зміну показань витратоміра. Для сухого газу нове значення густини ρ визначається через густину ρ_H при нормальних умовах по формулі

$$\rho = \rho_H \frac{p \cdot T_H}{p_H \cdot T \cdot k}, \quad (3.5)$$

де p й T — дійсний тиск й абсолютна температура середовища; p_H і T_H — параметри середовища при нормальних умовах; k — коефіцієнт стисливого середовища, який визначається по [5].

Для рідини густина ρ при температурі t може обчислюватися по формулі

$$\rho = \rho_p [1 - \beta(t - t_p)], \quad (3.6)$$

де ρ_p — густина рідини при розрахунковій температурі t_p ; β — середній коефіцієнт об'ємного теплового розширення рідини в інтервалі температур від t_p до t .

Середня квадратична відносна похибка виміру витрат дифманометром, що показує, визначається по формулі

$$\sigma_Q = \sqrt{\sigma_\alpha^2 + \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_{k_{Re}}^2 + \sigma_\rho^2/4 + \sigma_{\sqrt{\Delta p}}^2}. \quad (3.7)$$

Складові підкореневого вираження визначаються по [5].

Електромагнітні витратоміри застосовні для виміру витрат електропровідних середовищ. Тому вони не можуть бути використані для виміру витрати газів, нафтопродуктів, масел й інших непровідних середовищ. Конструкція вимірювального перетворювача витратоміра практично не змінює форму й перетин трубопроводу й тому може широко використовуватися для виміру забруднених рідин і пульп. Це один з деяких методів, що дозволяють вимірювати витрати рідких металів.

Ультразвукові витратоміри дозволяють вимірювати витрати без безпосереднього контакту з вимірюваним середовищем. Цей метод поки застосовується тільки для виміру витрати рідин. Схема ультразвукового витратоміра досить складна. Тому вони поки не знайшли широкого застосування в промисловості.

Деяке поширення одержали теплові витратоміри (калориметричні, термоанемометричні), робота яких заснована на залежності теплообміну між елементом, що нагрівається і потоком від швидкості (витрати) вимірюваного середовища.

3.1 ЗАДАЧІ ПО РОЗРАХУНКУ ВИТРАТИ

Задача 3.1.1. По трубі діаметром $D = 120$ мм рухається потік рідини з середньою швидкістю $v_c = 1,75$ м/с. Визначте масову витрату рідини, якщо її густина $\rho = 990$ кг/м³.

Задача 3.1.2. При встановленні діафрагми у трубопроводі номінальна витрата середовища складає 230 т/год., діафрагма була розрахована на $Q_{\text{макс}} = 250$ т/год., а дифманометр — на $\Delta p_{\text{макс}} = 4$ кПа. Однак, у процесі експлуатації з'ясувалося, що витрата середовища буде дорівнювати 380 т/год. Замінити діафрагму немає можливості. Підберіть дифманометр, за допомогою якого можливо б було виміряти витрату 380 т/год.

Задача 3.1.3. Трубопровід заповнений газом, що не конденсується. Імпульсні трубки до мембранного дифманометра часткового заповнені водою, причому при нульовій витраті рівень в цих трубках однаковий (рисунок 3.1).

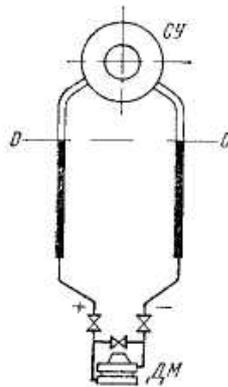


Рисунок 3.1

Внутрішній діаметр імпульсних трубок дорівнює $d = 10$ мм. Дійсна витрата газу $Q_0 = 10$ м³/год., при цьому перепад тиску на діафрагмі $\Delta p = 10$ кПа, зміна об'єму камер дифманометра $\Delta V = 4$ см³. Густина води в імпульсних трубках $\rho = 1000$ кг/м³. Яку витрату буде показувати дифманометр-витратомір?

Задача 3.1.4. Роздивимося схему виміру витрати перегрітої пари (рисунок 3.2).

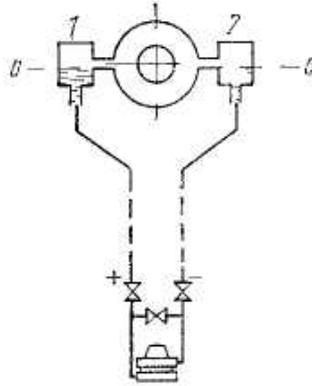


Рисунок 3.2

Ємкість 1 внутрішнім діаметром $d_1 = 100$ мм під'єднана до міста відбору тиску перед соплом, така ж ємкість 2 служить для відбору тиску після пристрою, що звужує. Ємкості під'єднані до мембранного дифманометру імпульсними трубками внутрішнім діаметром $d_2 = 10$ мм. При нульовій витраті обидві імпульсні трубки і ємкості заповнені конденсатом до однакового рівня, позначеного на рисунку 3.2 лінією О-О. Припустимо, що витрата збільшилася від нуля до $Q_{\text{макс}} = 10$ т/год., при цьому перепад тиску на соплі складає $\Delta p_{\text{макс}} = 10$ кПа, зміна об'єму камер дифманометра, яка відповідає цьому перепаду, $\Delta V = 4$ см³. Густина конденсату в імпульсних трубках $\rho = 1000$ кг/м³. Визначте похибку показань витратоміра, яка викликана різницею рівнів в імпульсних трубках.

Задача 3.1.5. Густина азоту ρ у рівнянні витрати для конкретних значень p і T розраховується за наступним рівнянням

$$\rho = \rho_H \frac{p \cdot T_H}{p_H \cdot T \cdot k},$$

де $T_H = 293$ К; $p_H = 1,0332$ кг/см²; $\rho_H = 1,166$ кг/м³.

Максимальна абсолютна похибка показань барометра $\Delta p_{\text{б}} = 0,1$ мм.рт.ст. Тиск вимірюється манометром зі шкалою 0...1 МПа класу точності

1,5, показання манометра $p = 0,8 \text{ МПа}$. Температура вимірюється термометром з похибкою $\Delta t = \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Поточне значення температури $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, барометричний тиск $101,3 \text{ кПа}$. Оцініть середню квадратичну похибку визначення густину азоту σ_ρ .

Задача 3.1.6. Калориметричний витратомір складається з нагрівача потужністю 200 Вт , виконаного з дроту діаметром $0,5 \text{ мм}$; діаметр трубопроводу 100 мм . Визначте різницю температур вимірюваного середовища до та після нагрівача при витраті $Q_0 = 50 \text{ м}^3/\text{год}$. Вимірюване середовище – вода або повітря. Вихідна температура вимірюваного середовища $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

Задача 3.1.7. Визначте витрату димових газів через циліндричний трубопровід, якщо перепад тиску на напірній трубці $\Delta p = 50 \text{ кгс/м}^2$. Діаметр трубопроводу $D = 200 \text{ мм}$, коефіцієнт трубки $k_T = 0,98$, густина газів $\rho = 0,405 \text{ кг/м}^3$. Трубка установлена на відстані $23,8 \text{ мм}$ від стінки трубопроводу. Кінематична в'язкість газів $\nu = 93,6 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$.

Задача 3.1.8. Витрата води, яка протікає по трубопроводу $D = 225 \text{ мм}$, складає $Q_M = 150 \text{ т/год}$. Відносна площа діафрагми $m = 0,5$, тиск води $p = 10 \text{ МПа}$, температура $t = 175 \text{ }^\circ\text{C}$. Визначте значення перепаду тиску на пристрої, що звужує.

4 ВИМІРЮВАННЯ РІВНЯ

На даний час існує велика кількість методів виміру рівня рідин і сипучих тіл. Одним з найпоширеніших методів виміру рівня рідин є вимір гідростатичного тиску стовпа рідини, який здійснюється водомірним склом і його різновидами, а також манометричними або пневмометричними пристроями. У всіх цих методах, як правило, головною є похибка за рахунок зміни густини вимірюваної рідини від температури. Для виключення або

зменшення цієї похибки створюються складні вимірювальні системи, що одночасно вимірюють гідростатичний тиск рідини і її густину й потім показання рівнеміра відповідно до густини коригуються. Природно, що ускладнення вимірювальної системи зменшує її надійність.

Всі системи виміру рівня рідин гідростатичним методом вимагають ретельного аналізу вимірювальної системи, сполучних ліній, їхнього температурного режиму, особливостей роботи вимірювальних перетворювачів системи. Наприклад, для однієї й тієї ж схеми виміру рівня в барабані парогенератора гідростатичним методом застосування мембранних дифманометрів замість поплавкових істотно зменшує можливі похибки виміру рівня. Це порозумівається тим, що обсяг рідини, що переміщається в мембранних дифманометрах при зміні вимірюваного рівня, значно менше, ніж у поплавкових.

Пневмометричний метод виміру рівня заснований на вимірі тиску повітря (інертного газу), що врівноважує гідростатичний тиск стовпа рідини. Тому крім недоліків й особливостей гідростатичного методу виміру тут додається специфіка пневмометричної системи.

Одними з найбільш простих і надійних є поплавкові рівнеміри. Однак вони практично не можуть застосовуватися при високих тисках. Деякий прогрес щодо цього представляють буйкові рівнеміри, які можуть працювати й при значних тисках. Але застосування як поплавкових, так і буйкових рівнемірів утруднено в агресивних рідинах й у середовищах з опадами, що випадають.

Ємнісні рівнеміри можуть застосовуватися для виміру як непровідних, так і провідних рідин. Вони придатні для виміру рівня в широкому діапазоні тисків і температур вимірюваних середовищ, як агресивних, так і неагресивних. Показання їх залежать від діелектричної проникності середовища, що може змінюватися з температурою. Застосування компенсаційних ємностей дозволяє істотно зменшити цей вплив, але не

виключає його повністю. Схемне виконання електронної частини ємнісних рівнемірів досить складне, що обмежує їхнє широке поширення.

Радіоізотопні рівнеміри, як правило, застосовуються в тих випадках, коли безпосередній контакт із вимірюваним середовищем за якимись причинами небажаний (наприклад, рівень рідкого хлору, шихти в доменній печі й т.д.). Варто мати на увазі, що на показання радіоізотопних рівнемірів практично не впливає зміна густини вимірюваного середовища (для принципів схем, прийнятих у серійних приладах).

4.1 ЗАДАЧІ ПО ВИЗНАЧЕННЮ РІВНЯ

Задача 4.1.1. Рівень води в ємкості вимірюється гідростатичним способом по схемі, яка зображена на рисунку 4.1.

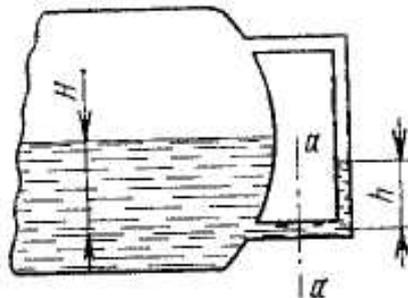


Рисунок 4.1

Максимальний рівень $H_{\text{макс}} = 565$ мм. Оцініть відносну похибку вимірювання максимального рівня, яка викликана зміною рівня води у мінусовій імпульсній трубці мембранного дифманометра. Внутрішній діаметр імпульсних трубок $d = 18$ мм. При зміні рівня від 0 до $H_{\text{макс}}$ відбувається зміна об'єму мінусової камери дифманометра на $\Delta V = 5$ см³. При $H = 0$ рівні води в обох імпульсних трубках рівні. Температура навколишнього середовища і води в ємкості та трубках $t = 22$ °С.

Задача 4.1.2. Рівень води у відкритій ємкості вимірюється дифманометром-рівнеміром. Рівнемір градуювався при температурі води у

ємкості та імпульсних трубках $44\text{ }^{\circ}\text{C}$. Змінюються чи ні показання рівнеміра, якщо температура води у ємкості збільшилася до $85\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура води в імпульсних лініях залишилася $44\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 4.1.3. Рівень води в барабані котельної установки вимірюється водомірним склом (рисунок 4.1). Тиск пари в барабані $9,5\text{ МПа}$, вода в барабані знаходиться при температурі насичення. Дійсне значення рівня $H = 0,38\text{ м}$. Визначте рівень у водомірному склі h , якщо температура води у водомірному склі складає $145\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Задача 4.1.4. Вимірювання рівня води у барабані котла відбувається за допомогою двокамерної зрівняльної посудини (рисунок 4.2).

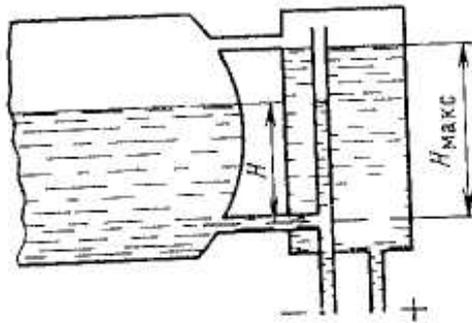


Рисунок 4.2

Температура води у посудині дорівнює температурі води у ємкості. Чи буде у цьому випадку зміна густини води впливати на покази рівнеміра? Тиск в барабані $0,1\text{ МПа}$.

Задача 4.1.5. П'езометричний рівнемір вимірює рівень лугу у випарювальному апараті (рисунок 4.3). Визначте тиск повітря у джерелі живлення і примірну годинну витрату повітря при максимальному рівні. Максимальна густина розчину лугу $\rho_{\text{л}} = 1280\text{ кг/м}^3$. Діапазон зміни рівня $0 - 400\text{ мм}$, внутрішній діаметр пневмометричної трубки $d = 6\text{ мм}$, температура рідини у апараті $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, абсолютний тиск в апараті 16 кПа .

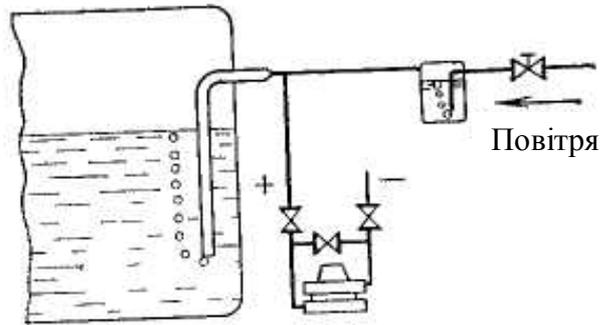


Рисунок 4.3

Задача 4.1.6. Визначте залежність перепаду, який діє на дифманометр (рисунок 4.4), від рівня і густин води та пари у барабані.

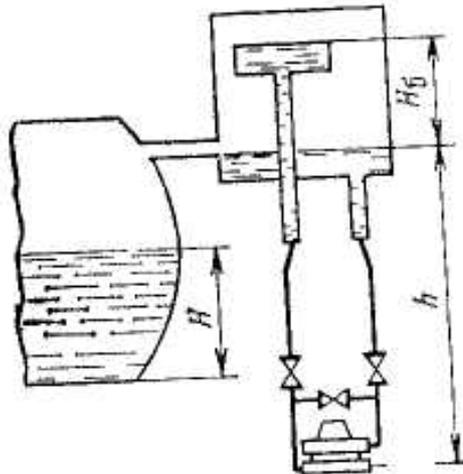


Рисунок 4.4

Вода і пара у барабані знаходяться на лінії насичення при $p = 15$ МПа. Температура води в імпульсних лініях 30 °С.

5 АНАЛІЗ СКЛАДУ СЕРЕДОВИЩ

Під аналізом складу середовищ розуміється вимір концентрації розчинів, концентрації водневих іонів по водневому показнику рН, змісту окремих компонентів у газових сумішах, вологості газів і ряду інших показників.

Розглянемо деякі поняття й формули, необхідні для рішення завдань. Постійна електролітичного осередку K — це коефіцієнт, що визначає співвідношення між питомою електропровідністю χ_0 розчину й електропровідністю χ осередку або її опором R_0 :

$$\chi_0 = K \cdot \chi = K(1/R_0). \quad (5.1)$$

Опір вимірювального електролітичного осередку залежить не тільки від концентрації розчину, але й від температури. У вузькому температурному інтервалі, наприклад 5—10 °С, можна вважати, що залежність опору осередку R_0 від температури має вигляд

$$R_{0t} = \frac{R_{01}}{1 + \beta(1 - t_1)}, \quad (5.2)$$

де R_{01} — опір осередку при температурі t_1 ; β — температурний коефіцієнт електропровідності розчину.

Слід зазначити, що в ряді задач і рішень розглядаються два поняття: опір електродного осередку й опір вимірювального осередку. Під опором електродного осередку мається на увазі опір тільки рідини, що заповнює міжелектродний простір. Опір вимірювального осередку - це опір, утворений опором електродного осередку й опором шунта.

У задачах на вимірювання рН розчинів треба насамперед пам'ятати загальну залежність між потенціалом E вимірювального електрода й концентрацією C іонів у розчині — рівняння Нернста

$$E = E_0 + \frac{R \cdot T}{n \cdot F} \ln f_{H^+} + [H^+], \quad (5.3)$$

де $R = 8,317$ Дж/(К·г-моль) — газова стала; T — температура, К; n — валентність іона; $F = 96\,522$ Кл/г-екв — число Фарадея (заряд грам-еквівалента іонів); f_{H^+} — коефіцієнт активності іонів водню; $[H^+]$ — концентрація водневих іонів, г-іон/л; E_0 — нормальний електродний потенціал (потенціал, що має електрод при зануренні в розчин з нормальною

концентрацією $[H^+] = 1$ г-іон/л), мВ. Слід зазначити, що фактично вимірюється не концентрація водневих іонів по $pH = -\lg [H^+]$, а активність іонів водню в розчині $pH = -\lg f_H + [H^+]$ [6]. У багатьох випадках $\lg [H^+] \approx \lg f_H + [H^+]$, тому в задачах часто говориться про вимір концентрації водневих іонів по pH . Для водневого електрода $E_0 = 1$ й $n = 1$, тому рівняння $E = f(pH)$ приймає вид

$$E = -\frac{2,303 \cdot R \cdot T}{F} \cdot pH = -0,1984 \cdot T \cdot pH. \quad (5.4)$$

У загальному виді різниця потенціалів E , мВ, між вимірювальним електродом (найчастіше однієї з різновидів скляного електрода) і порівняльним електродом можна записати в такий спосіб:

$$E = E_i - (54,16 + 0,198 \cdot t)(pH - pH_i), \quad (5.5)$$

де t — температура розчину, °С; E_i і pH_i — координати ізопотенційної крапки.

Із цієї формули легко можуть бути отримані вираження для коефіцієнтів перетворення $\Delta E / \Delta pH$ й $\Delta E / \Delta t$.

При рішенні задач по газовому аналізі варто звернути увагу на фізичні основи роботи різних газоаналізаторів, їхній пристрій й електричні схеми.

У задачах по термокондуктометричним газоаналізаторах передбачається, що вимірювальна камера являє собою порожній циліндр, усередині якого коаксіально розташована платинова нитка (чутливий елемент). Тепловідведення від одиниці поверхні нитки до стінок здійснюється в основному теплопровідністю відповідно до вираження

$$Q = \lambda \cdot (t_H - t_C), \quad (5.6)$$

де t_H й t_C — температура відповідно нитки й стінки камери, °С; λ — теплопровідність суміші при температурі, яка дорівнює $(t_H + t_C) / 2$, Вт/(м·К).

Теплопровідність суміші в такий спосіб пов'язана з теплопровідністю компонентів λ_i й їхньою об'ємною концентрацією C_i

$$\lambda_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot C_i. \quad (5.7)$$

У задачах по термомагнітних газоаналізаторах основним є вираження для сили, що діє на одиничний обсяг парамагнітної суміші, що перебуває в неоднорідному магнітному полі [7]:

$$F_M = C \cdot \chi_0 \cdot T_0^2 \left(\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2} \right) \frac{p}{p_0} \cdot H \frac{dH}{dx}, \quad (5.8)$$

де C — відносна концентрація компонента (наприклад, кисню); χ_0 — об'ємна магнітнасприйнятливність компонента при нормальному тиску $p_0 = 760$ мм рт. ст. і нормальній температурі $T_0 = 273$ К; H — напруженість магнітного поля, А/м; T_1 — температура газу на вході у вимірювальні камери, К; T_2 — температура газу після обігріву ниткою, К.

Ця сила визначає інтенсивність термомагнітної конвекції, що у свою чергу впливає на відвід теплоти від чутливого елемента, тобто його температуру. У реальних умовах інтенсивність газової конвекції визначається не тільки силою F_M але й силою теплової конвекції. Тому зміна показань приладу при зміні температури t і тиску p газової суміші відрізняється від розрахованого тільки по зміні F_M .

Принцип дії оптико-акустичних газоаналізаторів заснований на явищі вибірного поглинання аналізованим компонентом енергії випромінювання певної довжини хвилі, причому інтенсивність цього поглинання залежить від концентрації аналізованого компонента в газовій суміші. Ця залежність описується вираженням

$$I_\lambda = I_{0\lambda} \exp(-\varepsilon_\lambda C \cdot l), \quad (5.9)$$

де $I_{0\lambda}$ — інтенсивність випромінювання на вході в поглинаючий шар газу; I_λ — теж після проходження шару газу; ε_λ — коефіцієнт поглинання, характерний для аналізованого компонента газової суміші й довжини хвилі λ ; C — концентрація аналізованого компонента в газовій суміші; l — товщина поглинаючого шару.

Найбільше поширення при вимірі вологості повітря одержали різні варіанти психрометрів і визначення вологості по крапці роси. Психрометричний метод заснований на залежності між вологістю повітря й показаннями сухого t_c й мокрого t_m термометрів. При використанні психрометра «психрометрична різниця» $t_c - t_m$ залежить не тільки від відносної вологості повітря, але й від конструкції психрометра, що визначає інтенсивність охолодження мокрого термометра за рахунок випару вологи. Тому психрометричні таблиці можуть складатися тільки для конкретних типів психрометрів.

Вимір вологості по методу крапки роси є одним з точних методів, що одержав широке поширення в промисловості. Ці гігрометри мають широкі межі застосування по температурі, тиску й вологості повітря. Однак вони відрізняються деякою складністю конструкції, а також впливом на результат виміру стану поверхні дзеркальця.

При рішенні задач даного розділу можуть знадобитися дані про всілякі фізичні, хімічні й інші властивості речовин. Ці дані можна взяти з П-32 — П-53 [2], а також у відповідних довідкових виданнях [8, 9].

5.1 ЗАДАЧІ ПО ВИЗНАЧЕННЮ АНАЛІЗУ СКЛАДУ СЕРЕДОВИЩ

Задача 5.1.1. Визначте концентрацію CO_2 в продуктах згорання, якщо аналіз вмісту CO_2 проводився об'ємно-абсорбційним газоаналізатором. Об'єм суміші у вимірювальній бюретці до поглинання $V_0 = 100$ мл, об'єм після поглинання $V_{\text{п}} = 94$ мл. Об'єм шкідливого простору поза вимірювальної

бюретки $V_{в.п.} = 2,5$ мл. Коефіцієнт $K_{п.}$, який характеризує відношення об'єму компонента, який поглинається в газоаналізаторі, до об'єму цього компоненту до поглинання, дорівнює 0,95.

Задача 5.1.2. Вимірювальний електрод має внутрішній опір $R_{н} = 50$ МОм, електрод зіставлення $R_{с} = 20$ кОм. Електрорухома сила, яка розвивається системою, 500 мВ. Для вимірювання ЕРС використовується мілівольтметр з діапазоном 0-0,5 В та вхідним опором $R_{вх} = 0,5$ кОм. Якими будуть його показання при приведених умовах?

Задача 5.1.3. Визначте коефіцієнт перетворення водневого електроду і його залежність від pH при $t = 35^{\circ}C$ при наступних значеннях постійних, які входять до рівняння Нернста: універсальна газова стала $R = 8,317$ Дж/(К·г-моль), число Фарадея $F = 96522$ Кл/г-екв.

Задача 5.1.4. Роздивимося варіант двоканальної схеми оптико-акустичного газоаналізатора (рисунок 5.1).

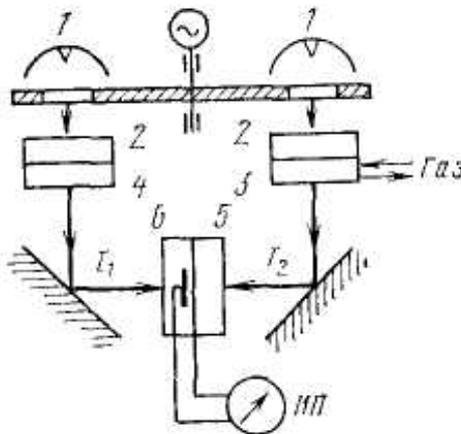


Рисунок 5.1

У цій схемі потоки променевої енергії від джерел інфрачервоного випромінювання 1 проходять крізь фільтрувальні камери 2 і потім поступають у вимірювальну 3 та зрівняльну 4 камери, а потім у промінеприймачі 5 і 6. Визначте залежність між концентрацією компонента, що аналізується у суміші і відношенням потоків енергій, які поступають у промінеприймачі 5 і 6.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. СТ СЭВ 1059-78. Термометры термоэлектрические рабочие. Общие технические требования.
2. Кузнецов Н.Д., Чистяков Н.С. Сборник задач и вопросов по теплотехническим измерениям и приборам. — М. Энергоатомиздат. 1985 — 328с.
3. Преображенский П.П. Теплотехнические измерения и приборы — М.: Энергия, 1978. — 703с.
4. Кремлёвский П. П. Расходомеры и счётчики количества — 3-е изд. Л.: Машиностроение, 1975. — 775 с.
5. Правила измерения расхода газов и жидкостей стандартными сужающими устройствами: РД 50-213-80. М.: Изд-во стандартов, 1982. — 320 с.
6. Кантере В. М., Казаков А. В., Кулаков М. В. Потенциометрические и титриметрические приборы. М.—Л.: Машиностроение, 1970. — 303 с.
7. Павленко В. А. Газоанализаторы. М.—Л.: Машиностроение, 1965. — 295 с.
8. Краснощёков Е. А., Сукомел А. С. Задачник по теплопередаче. — 3-е изд. М.: Энергия, 1975. — 278 с.
9. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Изд-во физико-математической литературы, 1963. — 708 с.

ДОДАТОК 1

Термоелектричні перетворювачі

Тип термопари (позначення)	Робочий діапазон, °C		$a, ^\circ\text{C}$	$b \cdot 10^3$	$c, ^\circ\text{C}$
Мідькопелева	-200 — 0		1,3	-1,1	0
	0 — 100			0	0
Мідь — міднонікелієва Т	-200 ÷ -100		3	-20	-100
	-100 ÷ 400			0	0
Залізо — міднонікелієва	-200 ÷ -100		3	-20	-100
	-100 ÷ 400			0	0
	400 — 900			7,5	400
Хромель — копелева (раніше ХК)	-50 ÷ 300		2,5	0	0
	300 — 800			6	300
Нікельхром — міднонікелієва Е	-100 ÷ 400		4	0	0
	400 — 900			7,5	400
Нікельхром — нікельалюмелева К (раніше хромель- алюмелева ХА)	-200 ÷ -100		4	-10	-100
	-100 ÷ 400			0	0
	400 — 1300			7,5	400
Платинородій (10 %) — платинова S	1-ий клас точності	0 — 300 300 — 1600	1,5	0	0
	2-ий клас точності	0 — 600 600 — 1600		3	0
Платинородій (30 %) — платинородієва (6 %) В	300 — 600		3	0	0
	600 — 1800			5	600
Вольфрамрений (5 %) — вольфрам-ренийєва (20 %), раніше ВР 5/20	0 — 1000		5	0	0
	1000 — 1800			6	1000
	1800 — 2500			10	1800