

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ,
МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ**

Харківський державний університет харчування та торгівлі

**Лабораторний
практикум
з теплотехніки**

Навчальний посібник

Харків
2011

УДК 536.2:621.4

ББК 31.3

Л12

Авторський колектив

М.Т. Малафаєв О.І. Торяник А.Л. Фоцан М.А. Чеканов

Рецензенти:

д-р техн. наук, проф. О. В. Богомолів,

д-р техн. наук, проф. В.О. Потапов

Рекомендовано вченою радою ХДУХТ як навчальний посібник для студентів (протокол № від 06.07.2011 р.)

Лабораторний практикум з теплотехніки [Текст]: навч. посібник / Л12 М. Т. Малафаєв [та ін.]; Харк. держ. ун-т харч. та торгівлі. – Х., 2011. – 87 с.

У посібнику до лабораторного практикуму розглянуто 9 лабораторних робіт для вивчення основних законів теплотехніки. Він містить короткі відомості з теорії та необхідні методичні рекомендації до виконання та розрахунку робіт. Розглянуті питання з досліджень термодинамічних та теплофізичних властивостей реальних речовин, відомості з теплотехнічних вимірювань, що необхідні під час виконання робіт.

Посібник пропонується студентам за напрямком підготовки “Харчові технології та інженерія”, “Обладнання харчових та переробних виробництв”. Посібник може бути використаний у самостійній роботі студентів при підготовці до виконання лабораторних робіт та при розрахунках та аналізі результатів есперименту.

УДК 536.2:621.4

ББК 31.3

© Малафаєв М.Т., Торяник О.І.,
Фоцан А.Л., Чеканов М.А., 2011

© Харківський державний університет
харчування та торгівлі, 2011

ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ПРОВЕДЕННЯ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМУ

Практикуму з теплотехніки має на меті:

- *закріплення* теоретичного матеріалу лекційного курсу;
- *ознайомлення* студентів із засобами вимірювання основних термодинамічних та теплофізичних параметрів речовин, параметрів теплообміну;
- *допомогу* студентам у оволодінні практичними навичками роботи з теплотехнічними приладами;
- *вивчення* техніки проведення експериментів, практичних розрахунків теплофізичних параметрів речовин та теплообмінних процесів;
- *напрацювання* вмінь використовувати результати експериментів з практичною метою.

ПРАВИЛА ДЛЯ РОБОТИ СТУДЕНТІВ У ЛАБОРАТОРІЇ

1. До роботи у лабораторії допускаються студенти, що вивчили розділи теоретичного курсу, в яких викладено матеріал наступної лабораторної роботи, а також *твердо засвоїли вимоги техніки безпеки* .

2. Лабораторні роботи виконуються бригадами по 2-3 студенти.

3. Кожен студент зобов'язаний завчасно підготуватися до заняття за літературою, що рекомендована та контрольними питаннями.

4. Перед початком роботи необхідно підготувати бланк іспитів, отримати *допуск* до виконання роботи.

5. Ввімкнення лабораторних установок здійснюється тільки з *дозволу* та у *присутності* викладача .

6. При роботі з електричними нагрівачами необхідно стежити за режимами їхньої роботи, щоб струм не перевищував допустимого (що рекомендується), та щоб трубчасті нагрівачі повністю знаходились у воді. За випадку аварійної ситуації необхідно негайно вимкнути електричне живлення установки або всієї лабораторії, у разі неможливості для установки, та повідомити про це викладача .

7. Закінчивши вимірювання, *кожен* студент до виключення установки *зобов'язаний* подати викладачеві бланк іспитів (спостережень). Якщо результати досліду будуть визнані незадовільними, тоді їх необхідно переробити, інакше робота вважатиметься невиконаною.

8. Після прийняття викладачем результатів роботи необхідно встановити регулятор напруги у нульове або найменше рекомендоване положення та вимкнути живлення установки від мережі згідно з описом роботи.

9. Звіт з лабораторної роботи виконується на подвійному аркуші або спеціальному бланку. На першій сторінці аркушу або бланку проставляються прізвище, ім'я, по батькові студента, група, після цього - назва роботи, що виконується, основні формули, робоча схема і далі - таблиці, розрахунки, графіки та висновок за роботою.

10. Кожен студент зобов'язаний до наступного лабораторного заняття подати викладачеві оформлений звіт з попередньої роботи, без чого він не буде допущений до виконання чергової роботи. Для цього необхідно занести у них результати спостережень, розрахунків, побудувати необхідні графіки, а також скласти висновки з виконаної роботи, а також підготувати відповіді на контрольні запитання.

11. Робота вважається зданою тільки після співбесіди з викладачем за результатами спостережень та правильних відповідей на контрольні запитання, при цьому студент одержує відповідні бали до модульного контролю.

У лабораторії **КАТЕГОРИЧНО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ:**

1. Працювати, не засвоївши твердо вимоги правил техніки безпеки, грубо їх порушувати.
2. Виконувати роботу, не отримавши допуску від викладача.
3. Вмикати лабораторну установку самостійно без дозволу викладача, а також за його відсутності.
4. Відновлювати під напругою випадкові обриви електричного кола без відключення електричній мережі. Остаточна перевірка кола здійснюється викладачем.
5. Заносити до лабораторії сторонні предмети та верхній одяг.



Список рекомендованої літератури

1. Теплотехніка: Навчальний посібник / О.І. Торяник, М.Т. Малафаєв, Фощан А.Л./ ХДУХТ – Харків, 2008. – 160 с.
2. Теплотехніка: Підручник /Б.Х. Драганов та ін. (за ред. Б.Х. Драганова) – К.: "ІНКОС", 2005.– 504 с.– С. 3-173, С. 248–309.
3. Алабовский А.Н., Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача. – К.; Выща шк., 1990. – 225 с.
4. Лабораторный практикум по термодинамике и теплопередаче: Учеб. пособие / В.Н. Афанасьев, А.А. Афонин, С.И. Исаев и др.; Под. ред. В. И. Крутова.– М.: Высш. шк., 1988. – 216 с.
5. Теплотехника: Учебник для студентов вузов / А.М. Архаров, С.И. Исаев, И.А. Кожинов и др.; Под общ. ред. В.И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986.– 432 с.

РОЗДІЛ I

ТЕХНІЧНА ТЕРМОДИНАМІКА. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ЗАКОНИ

Технічна термодинаміка вивчає закони змінення та перетворення енергії у системи тіл, що знаходяться у енергетичній взаємодії.

Об'єкт термодинаміки – термодинамічна система.

Будь-яка термодинамічна система характеризують *параметрами стану*:

тиск (p), питомий об'єм (v), температура (T), внутрішня енергія (u), ентальпія (h), ентропія (s).

Питомий об'єм v це об'єм одиниці маси речовини, тобто $v = V/m = 1/\rho$, м³/кг, де V - об'єм речовини, m - її маса, кг, ρ - густина.

Тиск p - це відношення сили F , що діє на одиницю площі S поверхні нормально до неї, тобто $p = F/S$. Одиниця тиску у СІ - паскаль (1 Па = 1 Н/м²).

Вживаються позасистемні одиниці тиску:

1 мм рт. ст. = 133,3 Па, 1 мм вод. ст. = 9,8 Па, де $p = (\rho g)h$, $[h] = \text{мм}$;

1 бар = 10⁵ Па = 0,1 МПа = 750 мм рт. ст.;

1 ат (технічна атмосфера, 1 кгс/см²) = 0,981 бар;

1 атм (фізична атмосфера) = 760 мм рт. ст. = 1,013 бар.

Температура T - ступінь нагрітості тіл. Температуру вимірюють за шкалою Кельвіна (абсолютна – T , К) або Цельсія (t , °С): $T = 273,15 + t$.

Існують інші шкали температури – Фаренгейта, Реомюра та ін.

Більш докладніше див. лабораторну роботу ТД- 1.

$u = U/m$ – питома внутрішня енергія, Дж/кг,

$h = H/m = u + pv$ – питома ентальпія, Дж/кг,

S, s – питома ентропія, $ds = dq/T$, Дж/(кг К).

Питомі параметри (v, u, h, s, R, q, l) характеризують значення цього параметра для маси речовини $m = 1$ кг (наприклад, $v = V/m$).

Теплоємність - параметр речовини, який залежить від його стану (тверде, рідке або газоподібне), процесу (C_p, C_v та ін.) та кількості цієї речовини (питома та ін.). Він характеризується кількістю теплоти, що потрібна для нагріву тіла чи одиниці його кількості на один градус (К або °С). Вимірювання теплоємності здійснюється у калориметрах. Більш докладніше див. лабораторну роботу ТД - 2.

Ідеальним називають такий газ, для якого можна знехтувати розмірами молекул та силами міжмолекулярної взаємодії.

Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона) зв'язує основні параметри стану газу v, p, T :

для 1 кг газу $pv = RT$;

для m кг газу $pV = mRT$,

для 1 моля газу $pV_\mu = R_\mu T$, або в універсальній формі:

$pV = (m/\mu)R_\mu T$ – відоме з фізики як рівняння Клапейрона - Менделєєва;

де $R = R_\mu/\mu$ – *питома* газова стала, Дж/(кг К);

$R_\mu = 8314$ Дж/(кмоль К) - *універсальна* газова стала;

μ – молекулярна маса газу в кг/кмоль;

$V_\mu = 22,4$ м³/кмоль – за *нормальних умов* ($p = 1$ атм, $t = 0$ °С).

Теплоємність пропорційна величині газової сталої та кількості ступеней свободи молекул речовини.

Рівняння стану *реального газу* більш складне, тому що він може перетворитися у рідину внаслідок взаємодії між молекулами. Для розриву цих сил потрібна додаткова енергія - теплота пароутворення.

Найпростіше рівняння стану реального газу - рівняння Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - b) = RT, \quad (4.2)$$

де a – стала тяжіння між молекулами і b – стала, що характеризує власний об'єм молекул. Особливості явища *кипіння* реального газу із переходом з рідкого стану у газоподібний стан (пару) розглянуто у лабораторній роботі ТД- 4.

Основу термодинаміки становлять два закони.

Перший закон термодинаміки - це закон збереження і перетворення енергії у теплових процесах:

кількість теплоти, що надано тілу, витрачається на збільшення його внутрішньої енергії та на виконання тілом роботи над зовнішніми тілами:

$$Q = \Delta U + L.$$

Кількість теплоти Q , робота L та внутрішня енергія U вимірюються у джоулях (Дж). Q та L - це *параметри процесу*.

Диференціальна форма закону для 1 кг речовини $dq = du + dl = c_v dt + p dv$ (1-а форма) та $dq = dh + dl_o = c_p dt - v dp$ (2-а форма), l_o – наявна робота.

Основна термодинамічна тотожність:

$$dq = c_v dt + p dv = c_p dt - v dp = T ds.$$

Вона пов'язує між собою всі параметри стану.

Другий закон термодинаміки накладає деякі обмеження на перетворення енергії за першим законом та визначає напрям процесів, які відбуваються у природі, та має кілька визначень. Найвідоміші такі:

у природі неможливий процес, єдиним результатом якого був би перехід теплоти повністю у роботу;

теплота не може сама собою (без зовнішнього енергетичного впливу) переходити від тіла з нижчою температурою до тіла з вищою температурою.

Найважливішим наслідком закону є **теорема Карно**, що визначає максимально можливі *ККД* теплових машин за заданих температур T_1 та T_2 :

$$\eta_k = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$

та максимально можливі *холодильний коефіцієнт* зворотного циклу Карно

$$\varepsilon_k = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Основними термодинамічними процесами в ідеальних газах є:

ізохорний ($V = const$);
ізобарний ($p = const$);
ізотермічний ($T = const$);
адіабатний (без теплообміну з іншими тілами - $Q = 0$, або $s = const$).

Всі ці процеси є окремими випадками політропного процесу (для якого: теплоємність $C = const$ в інтервалі значень: $-\infty \leq C \leq +\infty$).

Також виділимо процес *дроселювання* реальних газів (ентальпія $h = const$).

Рівняння політропного процесу

$$p \cdot v^n = const,$$

де $n = \frac{c - c_p}{c - c_v}$ - показник політропи.

При $n = \pm \infty$ $p^{1/n} \cdot v = v = const$ – ізохорний процес,

$n = 0$ $p = const$ – ізобарний процес,

$n = 1$ $p \cdot v = const$ – ізотермічний процес,

$n = k$ $p \cdot v^k = const$ – адіабатний процес ($k = C_p/C_v$)

p v – діаграми ізопроцесів дивись на рисунку І.

Більш докладніше рівняння для різних ізопроцесів та їх параметрів - дивись лабораторну роботу ТД-3.

Основними діаграмами процесів є діаграми в p v - та T s -координатах.

Робота механічних, теплових та холодильних машин характеризується циклічністю. *Цикли* бувають *прямі* (рух по діаграмі - за напрямком стрілки годинника) та *зворотні* (рух - проти напрямку стрілки годинника). Цикли описують відрізками ізопроцесів. Площа, що обмежує цикли у p v -координатах відповідає роботі l_u , що одержана за робочій цикл та у T s -

координатах – теплоті за цикл $q_{ц}$. Для прямих циклів $l_{ц}$ та $q_{ц}$ додаткові та для зворотних циклів – від’ємні (дивись докладніше роботу ТД-5).

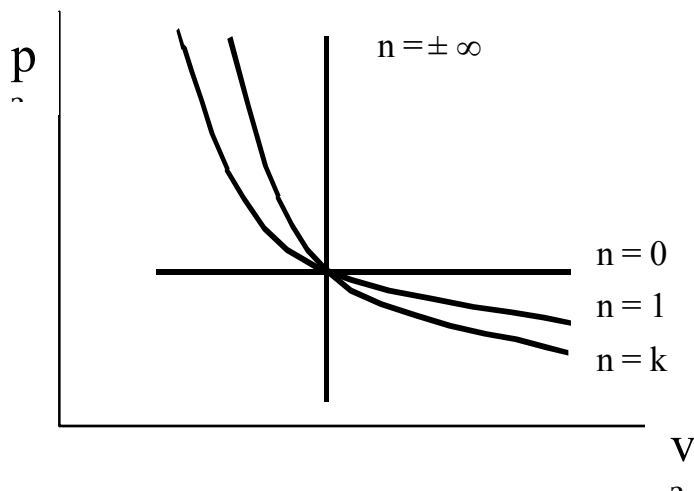


Рисунок I pV –діаграми ізопроцесів

Теплові машини перетворюють тепло від джерел теплоти у роботу, працюють за прямим циклом. Вони мають *термічний ККД* циклу:

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{(q_1 - q_2)}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1}.$$

Цикли двигунів внутрішнього згоряння (ДВЗ) студенти розраховують у спеціальному домашньому завданні.

Робота *холодильних машин* (працюють за зворотним циклом) характеризується *холодильним коефіцієнтом*

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l_{ц}} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$$

де - q_1 підведене тепло, q_2 - відведене тепло за цикл, $l_{ц}$ – робота за цикл. Для парокompресорних холодильників теплота та холодильний коефіцієнт розраховуються через ентальпію. Більш докладніше див. лабораторну роботу ТД- 5.

Теплові насоси призначені для отримання теплоти у зворотних циклах. Вони характеризується *обігрівним коефіцієнтом*

$$\varphi = \frac{q_1}{l_{ц}} = \frac{q_1}{q_1 - q_2} = \varepsilon + 1.$$

Двоблочні парокompресорні *кондиціонери* працюють у 2 режимах: як холодильні машини та як теплові насоси ($\varepsilon, \varphi \approx 3...5$). Вони виробляють в 3...5 разів більше холоду або теплоти ніж потребляють енергії від електромережі, "перекачуючи теплоту" між навколишнім середовищем та приміщенням.

СПОСОБИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

Теоретичний вступ

Температура є одним з основних термодинамічних параметрів стану, що входять у загальне рівняння стану системи $f(p, v, T) = 0$. Температура, яка визначена в абсолютній шкалі температур (шкалі Кельвіна), тобто у кельвінах (К), однозначно пов'язана з середньою тепловою енергією руху молекул E_k системи і з її внутрішньою енергією U та з кількістю ступеней свободи i молекул речовини. Для моля ідеального газу маємо

$$E_k = U = N_A \frac{i}{2} m v^2 = \frac{i}{2} N_A k_B T = \frac{i}{2} R T.$$

У шкалі Кельвіна відлік температури починається з абсолютного нуля температури (0 К). Кельвін є одним з основних одиниць системи СІ. Поряд з цією шкалою у практиці широко розповсюджені й інші температурні шкали, особливо шкала Цельсія, у якій температура вимірюється у градусах Цельсія (°С). Масштаб одиниці шкали Кельвіна та Цельсія однаковий, тобто: 1 °С = 1 К. Шкала Цельсія має дві реперні точки: 0 °С та 100 °С, відповідні до температур замерзання та кипіння води за нормального тиску. Співвідношення між температурою у °С і у К встановлюється виходячи з того, що 1 °С = 1 К але початки цих шкал різні. Реперна температура потрійної точки води дорівнює $T_n = 273,160 \text{ К} = 0,010 \text{ °С}$ (точно), тоді: $T = 273,15 + t$. У практичних розрахунках звичайно вважають що $T = t + 273$. Різниця температур (зростання температури, температурний напір - у теплопередачі), що знайдена за шкалою Кельвіна ($\Delta T = T_2 - T_1$) або за шкалою Цельсія ($\Delta t = t_2 - t_1$) становить однакову величину, $\Delta t \equiv \Delta T$! Поряд зі шкалою Цельсія у зарубіжній літературі зустрічаються також шкали Фаренгейта ($t [^{\circ}\text{F}] = 32 + 9/5 \cdot t [^{\circ}\text{C}]$), t (людини) = 100°F, $\Delta t = 100 \text{ °С} = 180 \text{ °F}$), Реомюра та ін.

Способи вимірювання температури і прилади для їхньої реалізації - термометри надто різноманітні. В їхній основі лежать відомі з фізики закони зміни з температурою різноманітних фізичних характеристик речовини (термометричного тіла): розмірів, об'єму, термо-ЕРС, електричного опору, інтенсивності теплового випромінювання та інші. Залежно від принципу дії розрізняють рідинні, газові термометри, термопари, термометри опору, пірометри та інші вимірники температури. Зараз все більшого розповсюдження набувають цифрові електронні термометри, що працюють разом з комп'ютерами або з системами автоматики.

Метою даної роботи є ознайомлення з найбільш розповсюдженими у науковій і теплотехнічній практиці способами вимірювання температури,

вивчення принципу дії термометричних приладів та надбання навичок користування різними термометрами.

Рідинний термометр

Принцип дії рідинного термометра полягає у тепловому розширенні тіл під час їх нагрівання: об'єм тіла V при підвищенні його температури від T_0 до T зростає приблизно за лінійним законом:

$$V = V_0 [1 + \beta(T - T_0)] \quad (1.1)$$

де: β – коефіцієнт об'ємного теплового розширення [1/К]. Якщо рідину помістити у трубку з малим поперечним перерізом, то ефект теплового розширення виявлятиметься у збільшенні довжини стовпчика рідини у трубці, причому це подовження приблизно пропорційне збільшенню температури рідини. Після відповідного градуювання за вимірним збільшенням стовпчика рідини можна судити про її температуру. Для забезпечення достатньої чутливості засобу рідина повинна розширюватися у дуже тонкій трубці-капілярі, іноді збільшують об'єм рідини V_0 – тоді ціна поділки може складати до 0,1...0,01 °С.

Рідинний термометр являє собою скляний балончик, заповнений термометричною рідиною, до якого приєднано капіляр. Шкала, градуйована у відповідних одиницях (К або °С), звичайно задається на пластинці, що прикріплена до капіляру. Вибір термометричної рідини визначається заданим температурним інтервалом роботи приладу. Найчастіше використовуються ртутні (інтервал від -38 °С до +500 °С) або спиртові (-80 ... +100 °С) термометри. Градування термометра здійснюється за реперними точками або шляхом порівняння зі зразковим термометром; у свою чергу, рідинний термометр може використовуватися для градування термометрів інших типів. Для збільшення інтервалу вимірювання температури над рідиною утворюють додатковий тиск газу.

Перевагами рідинних термометрів є простота конструкції, надійність у експлуатації і легкість відліку показань. Недоліками є їхні інерційність і порівняно великі габарити (для забезпечення широкого діапазону вимірювань), а також необхідність вживання запобіжних заходів через крихкість скла (для ртутних термометрів потрібно зважати на можливість забруднення приміщення ртуттю при їхньому руйнуванні). Крім того, рідинні термометри використовуються здебільшого для вимірювання температур рідин і газів, оскільки важко забезпечити щільний тепловий контакт балону термометра з твердою поверхнею.

Термопара

Від зазначених вище недоліків значною мірою вільні термопари, принцип дії яких полягає у явищі термоелектрики (ефект Зеєбека), що вивчається у курсі фізики. Складемо замкнене коло з двох різнорідних провідників А і В (які утворюють термоелектричну пару - *термопару*),

зварених або запаяних у двох точках 1 і 2, що найчастіше зветься "гарячим" (робочим) і "холодним" (вільним) спаями. У спаях з'являється контактна різниця потенціалів ϕ , що залежить від матеріалу і природи провідників та температур T_i спаїв (рис. 1.1). Для провідників використовують метали, їхні сплави або напівпровідникові матеріали. Якщо $T = T_o$, то завжди $\Delta\phi = \Delta\phi_o$. Якщо же, наприклад, $T \neq T_o$, то й $\Delta\phi \neq \Delta\phi_o$, і різниця електричних потенціалів $\Delta\phi - \Delta\phi_o = E$ характеризує у колі термоелектрорушійну силу, що виникає – термо-ЕРС.

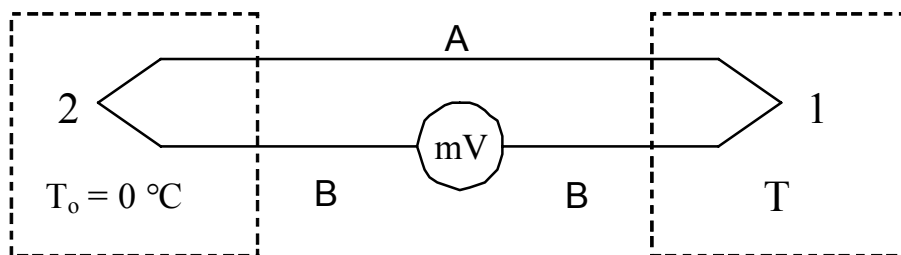


Рисунок. 1.1

У замкнутому колі внаслідок дії цієї ЕРС виникає термоелектричний струм. Якщо ж коло будь-де розірвати і підключити вимірювач напруги (звичайно мілівольтметр), то можна безпосередньо виміряти величину E . Згідно з електронною теорією металів і напівпровідників, величина термо-ЕРС характеризується певною (для даної термоелектричної пари) залежністю від температур "гарячого" і "холодного" спаїв. Ця залежність E від $(T - T_o)$ визначається під час градування термопари і подається у вигляді графіка або таблиці. Часто означена залежність на невеликому інтервалі температур ΔT близька до лінійної і тоді її можна визначити формулою

$$E = \gamma(T - T_o), \quad (1.2)$$

де $\gamma = dE/dT$ - чутливість даної термопари.

Серед різноманітних термопар найбільш розповсюджені термопари з таких сплавів і металів: хромель - копель (ХК), хромель - алюмель (ХА), платина - платинородій (ППР), мідь- константан (МК). Термопара ХК має найбільшу чутливість (близько 70мкВ/К), ХА – має найбільш лінійну залежність градування і тому широко використовується у електронних приладах, ППР - працює у найбільшому інтервалі температур від -260 до 1600°C, МК - нечутлива до магнітного поля. Оскільки чутливість усіх термопар змінюється з температурою, то їхнє градування звичайно надається у вигляді таблиць з початковою, майже реперною, точкою при 0 °C – точкою плавлення льоду (див. додатки 1 і 2).

Для отримання стандартних градувань термопар (додатки 1 і 2) або вимірювань температури застосовують схеми - рис. 1.1 або рис. 1.2. У випадку, як на рис.1.1 - для приєднання вимірювального приладу розривається один з провідників (В), а на рис.1.2 - розривається спай 2 (при 0 °C). Додаткових термо- ЕРС у спаях 2 і 2' не виникає, оскільки вони

знаходяться за однієї температури. Для проведення градування у схему додається еталонний термометр.

Визначення температури за даними термопар

Величина термо- ЕРС залежить не тільки від типу і якості термопар, але і від умов вимірювання: від температури термостату T_o , електричних опорів приладу R та провідників термопар r . Під час вимірювань однак, часто буває відсутнім термостат з $T_o = 0$ °С, і другий спай підключають до вимірювального приладу за кімнатної температури t_k ($t_o = t_k$ - рис. 1.1). Тоді для визначення температури необхідно врахувати зміщення градування термопар:

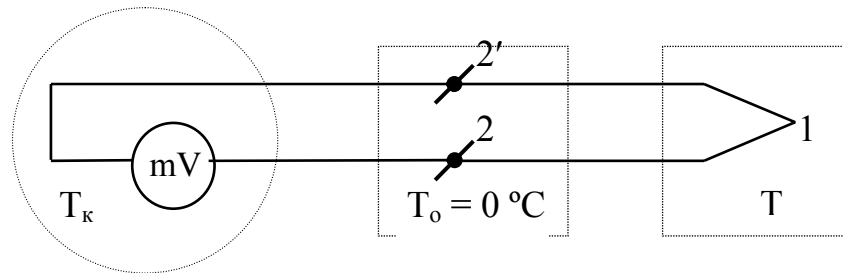


Рисунок. 1.2

$$E|_0^t = E|_0^{tk} + E|_{tk}^t \quad \text{або} \quad E_c = E_k + E_o, \quad (1.3)$$

де $E|_{tk}^t = E_o$ - вимірювана термо- ЕРС, $E|_0^{tk} = E_k$ - термо- ЕРС, що відповідає температурі "холодного" спаю (за температури t_k), $E|_0^t = E_c$ - сумарна термо- ЕРС, за значенням якої з таблиці градування визначається температура спаю t .

Для точності визначення термо- ЕРС E_o необхідно врахувати електричні параметри кола вимірювання. Внаслідок наявності опорів термопар r , приладу R та струму I у електричному колі термопар, на клеммах приладу маємо напругу $E = E_o - I r = E_o (1 - r/(R+r))$. Звідки

$$E_o = E / (1 - r/(R+r)) = E (1 + r/R) \quad (1.4)$$

Щоб знехтувати другим членом у формулі (1.4) при точності 0,1 % необхідно щоб $R/r > 1000$ (звичайно $r = 0,1 \dots 10$ Ом). Тому найкращими вимірювачами термо- ЕРС є цифрові прилади (з $R > 1$ МОм) і потенціометри (див додаток 4), у яких здійснюється повна компенсація ЕРС, тобто $I \rightarrow 0$, $R \rightarrow \infty$ та $E_o = E$.

Даний порядок визначення температури описаний у додатку 3.

Термометр опору

Принцип дії термометра опору ґрунтується на залежності питомого електричного опору ρ металів і напівпровідників від їхньої температури: для металів ρ зростає з підвищенням температури, для напівпровідників - зменшується. Для провідників – чистих металів (платини, міді та інших) залежність $\rho(T)$ є практично лінійною у широкому інтервалі температур:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (1.5)$$

де α - температурний коефіцієнт опору металу, ρ_0 - питоме значення опору при температурі T_0 , звичайно 0 °С (звернути увагу на формальну схожість формул (1.1) і (1.5)). Величина α вважається відомою і складає для чистої платини 0,0039 1/К та для чистої міді 0,0043 1/К. Опір R провідника (термоопору) довжиною l з поперечним перерізом S , що використовується для вимірювання температури, зважаючи на відоме співвідношення $R = \rho l/S$, змінюється з температурою також пропорційно ρ , відповідно до формули (1.5). Для вимірювання опору R існують різноманітні прилади, найбільш точними з яких є вимірювальні мости різноманітних типів (див. додаток 5).

У напівпровідниках температурна залежність більш складна, нелінійна та залежить в першу чергу від енергії активації руху електронів E :

$$\rho = A \exp (E/RT). \quad (1.6)$$

Цифрові методи вимірювання температури

Вимірювання температури останній час часто здійснюється під час керування технологічними процесами з допомогою цифрових датчиків та автоматики. У найпростіших схемах керування застосовуються аналогові або цифрові електронні компаратори, коли нагрівач включається чи вимикається якщо температура відрізняється від заданої на певну величину, наприклад, 0,1 °С. Для збільшення чутливості схеми застосовуються підсилювачі сигналу. У більш точних схемах керування враховується також інерційність системи, що визначається за швидкістю зміни температури системи з часом.

При контактному вимірюванні температури використовують класичні рідинні термометри, термопари, металеві або напівпровідникові терморезистори (термометри опору). Останнім часом також все ширше використовуються різноманітні напівпровідникові цифрові датчики вимірювання температури рис. 1.3.

Рідинним термометрам, термопарам, термометрам опору притаманні деякі недоліки, в першу чергу інерційність та відсутність будь-якої автоматизації. Це зменшує точність і збільшує час та похибку вимірювання. Цифрові термометри таких недоліків не мають. Перевагою таких датчиків є те, що вони можуть виготовлятися за технологією інтегральних мікросхем. Це дозволяє розмістити в одному кристалі як сам датчик, так і електроніку,

що проводить обробку сигналу, включаючи аналого-цифровий перетворювач (АЦП) і інтерфейсну частину, що пов'язує термометр з комп'ютером.

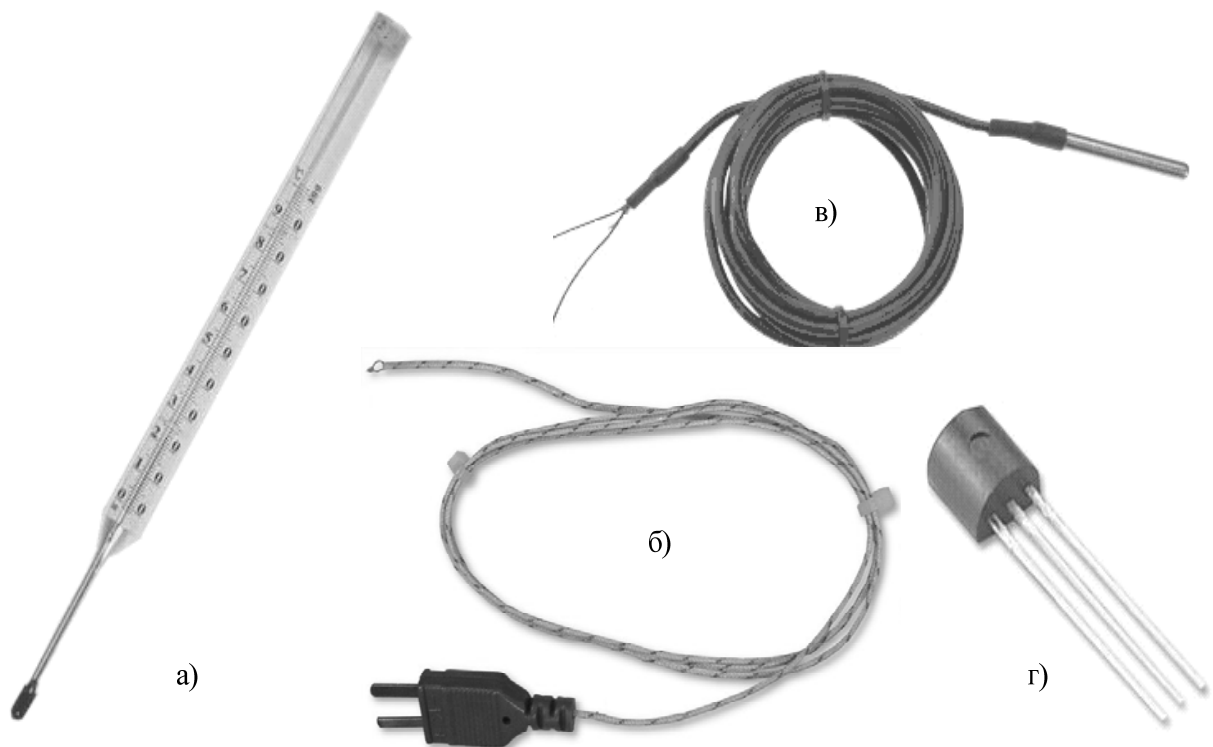


Рисунок 1.3 Види термометрів: а – рідинний термометр; б – термопара; в – термометр опору; г – цифровий датчик температури DS18B20

Принцип роботи цифрового датчика температури DS18B20 (рис. 1.3, г) заснований на ефекті зміни частоти коливань кварцового генератора в залежності від температури. Конструктивно датчик оформлений в корпусі малогабаритного транзистора (ТО92), термометр уже відкалібрований на заводі, чутливість становить $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$, а гарантована точність становить $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ в діапазоні від -55°C до $+125^{\circ}\text{C}$. Результат виміру температури датчик видає контролеру у вигляді двоїчного коду.

Датчик являє собою закінчену інтегральну мікросхему, що перетворює аналоговий сигнал (температура) за допомогою АЦП у цифровий сигнал (послідовний двоїчний код), що сприймається комп'ютером. Датчик з відповідною цифровою логічною схемою з'єднується з послідовним портом комп'ютера RS 232 (COM1) Інформація о температурі у вигляді послідовного двоїчного коду сприймається програмою VT-48 та виводиться на екран монітора, крім того, на екрані видно графік зміни температури за останні хвилини (рис. 1.4), масштаб за температурою встановлюється програмою автоматично. Також у програмі можливо поставити межі сигналізації та керування температури.

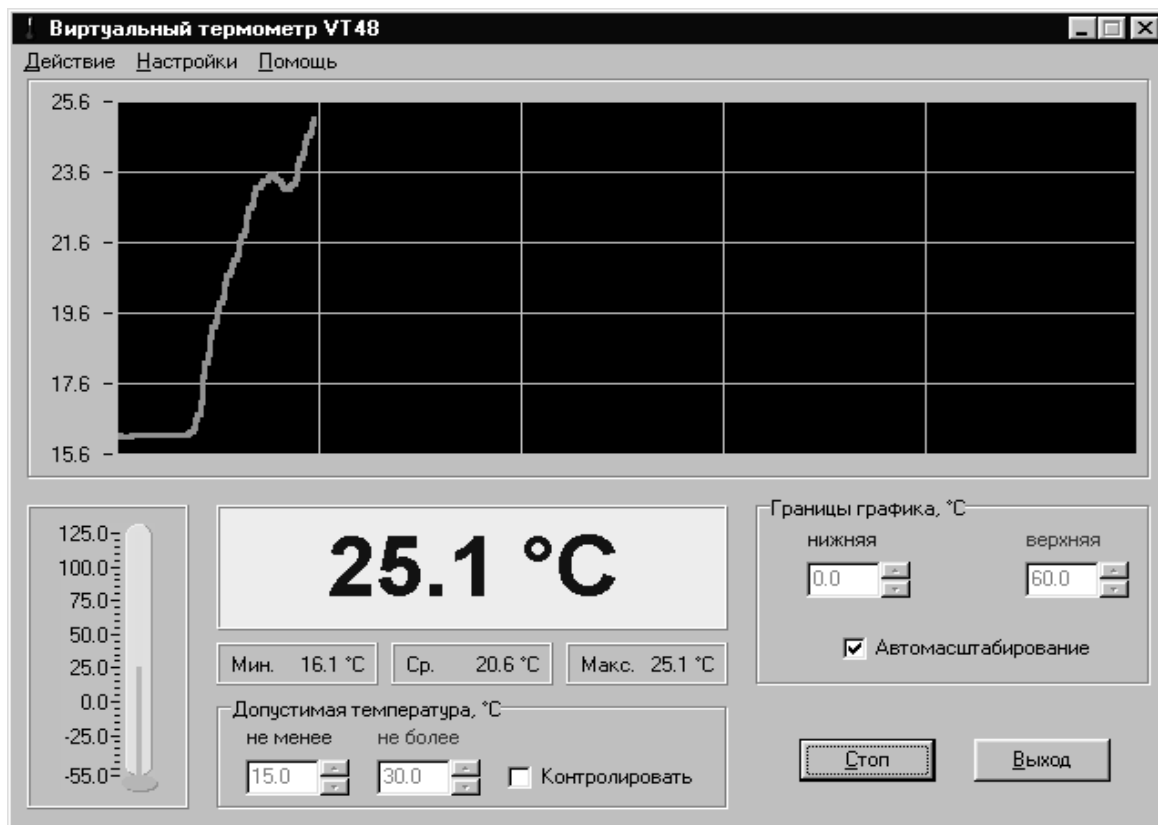


Рисунок 1.4 - Интерфейс програми VT48 датчика температури DS18B20

Вимірювання температури починається одночасно з натисканням кнопки «Пуск» комп'ютера. Окрім візуального спостереження за процесом вимірювання дані записуються в ОЗУ та ПЗУ комп'ютера, по закінченні вимірювання отриманні дані можна математично обробити за допомогою відповідних програм наприклад MS Excel або MathCAD. Обробка експериментальних даних за методом найменших квадратів дає можливість знайти регресійне рівняння, що описує зміну температури від часу. Це дозволить значно підвищити точність вимірювання температури, спрогнозувати її хід та скоротити час її вимірювання.

Інші методи вимірювання температури

Робота газових термометрів заснована на розширенні повітря або газу з температурою. Вони працюють у інтервалі від 1 К до 2000 К. Висока їхня точність ($\pm 0,001$ К) забезпечується наявністю *реперних точок* (точки плавлення або кипіння чистих речовин), які відомі з точністю $\pm 0,001$ К.

Оптичні пірометри дозволяють дистанційно визначати температуру тіл, що світяться (800...2000 °C), порівнюючи візуально їхні яскравості з яскравістю еталонної лампи. Точність визначення температури дорівнюється $\pm (5...10)$ К.

Температури зірок визначаються за спектрами їхнього теплового випромінювання в оптичному діапазоні хвиль - за довжиною електромагнітної хвилі у максимумі випромінювання і закону зміщення Вина

(див. роботу ТП-4). Цей спосіб застосовується і для визначення температур на Землі з гідрометеорологічних супутників (за випромінюванням у інфрачервоному діапазоні електромагнітних хвиль та з наступною обробкою даних на ЕОМ). За цим принципом працюють інші електронні термометри для дистанційного вимірювання температури, що зараз все більш розповсюджені.

Всі відомі способи вимірювання температури засновані на визначенні будь-якого параметру, що змінюється з температурою стабільно, беззупинно, однозначно, що і забезпечує задану точність вимірювань.

Експериментальна установка

Схему лабораторної установки надано на рис. 1.5. Лабораторна установка (рис. 1.5) складається з посудини з рідиною (П), у якій розміщено цифровий термометр (ЦТ), що використовується як еталонний, а також термометр рідинний (ТР), термопару (ТП) та термометр опору (ТО), які досліджуються, з нагрівального приладу (НП), лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) та вимірювальних приладів (ВМ, РП та компютера).

Швидкість нагрівання рідини у посудині регулюється за допомогою автотрансформатора (ЛАТРа). Величина опору термометра опору визначається вимірювальним мостом (ВМ) типу Р333, електрорушійна сила термопары – реєструвальним приладом (РП) – мілівольтметром (стрілочним чи цифровим) або потенціометром типу ПП-63.

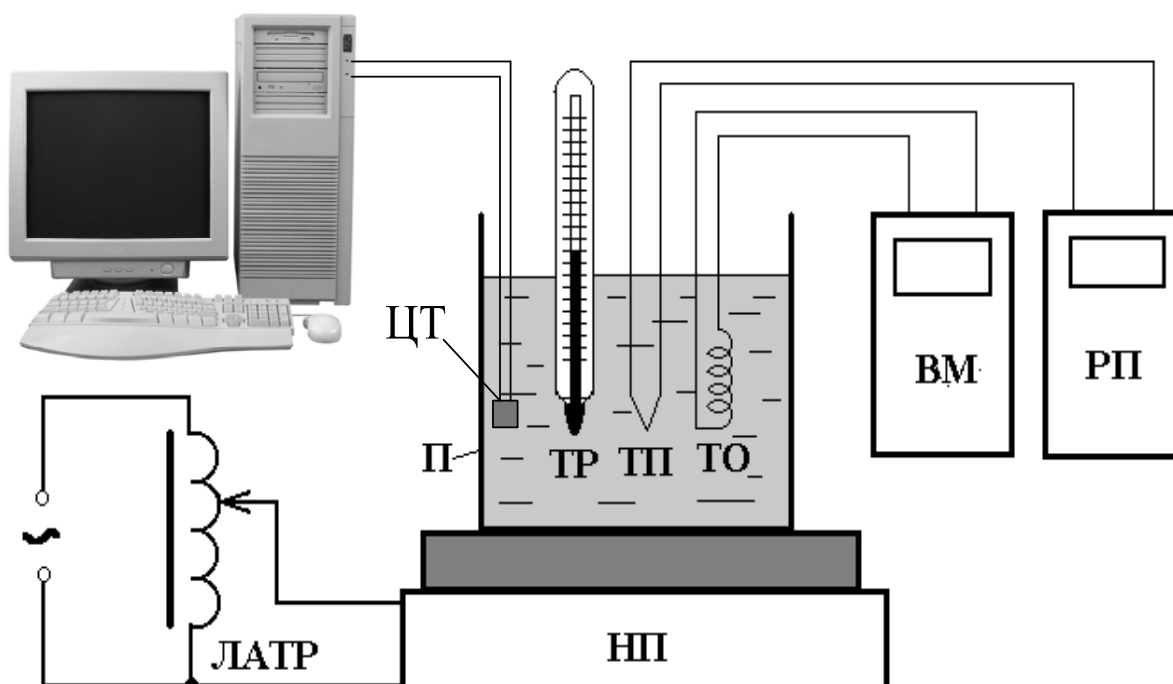


Рисунок 1.5. Схема установки

Порядок виконання роботи

1. Перевірити надійність підключення вимірювальних приладів і наявність потрібної кількості рідини у посудині П. Розмістити термометри ЦТ, ТР, ТП і ТО у посудині таким чином, щоб їхні нижні кінці знаходились на однаковій глибині і якомога ближче один від одного. Рідина потрібна для прискорення процесу теплообміну в її об'ємі та між усіма термометрами внаслідок значно більшої тепловіддачі у ній, порівняно з повітрям. Розмістити термометр ТР найбільш зручним для спостереження способом. Встановити підготовлену посудину з термометрами на нагрівальний прилад НП.

2. Включити живлення комп'ютера, потенціометра і вимірювального мосту. Заміряти величини температури рідини t_p , термо- ЕРС E і опору R за всіма датчиками (див. додатки 4 та 5), записати їх у перший стовпчик у таблиці 1.1.

3. Включити ЛАТР у електричну мережу і встановити на нагрівальному приладі напругу приблизно 120 ... 150 В, або за вказівкою викладача.

4. Спостерігати процес поступового підвищення температури у посудині П за показами термометру ЦТ. По досягненні температури 30 °С швидко зміряти величини за ТР, термо- ЕРС E , опору R та записати їх до табл. 1.1. Продовжувати записувати показання приладів через кожні 10 °С. Звернути увагу на характер підвищення температури з часом. При значному уповільненні нагрівання - підвищити напругу живлення на НП на 20 ... 30 В, але не більш, ніж до 200 В.

5. Після досягнення температури 90 °С та проведення вимірів вивести напругу на ЛАТРі до нуля і відключити його від мережі вимикачем на щитку. Перевірити відключення всіх кнопок на вимірювальних приладах та відключити їх живлення.

6. Визначте абсолютну похибку вимірювань температури за ТР $\Delta t_{TR} = t_{TR} - t_{ЦТ}$ та занесіть їх до таблиці 1.1.

7. Визначте температури за ТО та абсолютну похибку вимірювань температури за ТО $\Delta t_{TO} = t_{ТО} - t_{ЦТ}$ та занесіть їх до таблиці 1.1.

8. Побудувати залежність зміни $E(t)$ термопар на графіку, побудованому з дотриманням правил вибору масштабу по осям абсцис і ординат.

9. Використовуючи таблиці градування з додатків 1 та 2 для термопар хромель - копель і хромель - алюмель, нанести на побудований раніше експериментальний графік $E(t)$ декілька характерних точок з означених таблиць (кроком через 20 °С). Провести осереднені прямі для всіх графіків. Визначити за цими графіками осереднені чутливості всіх трьох термопар у мВ/К ($\gamma = \Delta E / \Delta T$), взявши для розрахунку дві найбільш рознесені точки на цих осереднених прямих. За цими даними зробити

висновок про те, для якої термопари було отримано криву градування у проведеному експерименті.

Таблиця вимірювань та розрахунків

Таблиця 1.1

$T_{ЦТ}, ^\circ\text{C}$	$t_p =$	30	40	50	60	70	80	90
$t_{TP}, ^\circ\text{C}$								
E, mV								
$R, \text{Ом}$								
$\Delta t_{TP}, ^\circ\text{C}$								
$t_{TO}, ^\circ\text{C}$								
$\Delta t_{TO}, ^\circ\text{C}$								
E_c, mV								
$t_{TP}, ^\circ\text{C}$								
$\Delta t_{TP}, ^\circ\text{C}$								

Кімнатна температура $t_k = \dots$ $^\circ\text{C}$, $E_k = \dots$ мВ

10. Визначити похибку градування термопари. Для цього визначити кімнатну температуру t_k та визначити E_k за таблицею градування вашої термопари (додатки 1 або 2). Якщо ЕРС E вимірюється мілівольтметром, то треба розрахувати величину E_o за формулою (1.4) (або див. додаток 3). Визначте сумарне значення ЕРС для кожної температури $E_c = E_o + E_k$. Розрахувати температуру t_{TP} та абсолютну похибку її вимірювань $\Delta t_{TP} = t_{TP} - t_{ЦТ}$ та занесить їх до таблиці 1.1.

11. Для термометра опору з провідника (металу) побудувати графік залежності $R(t)$. За нахилом кривої розрахувати величину температурного коефіцієнта опору α

$$\alpha = \frac{1}{R_o} \cdot \frac{R - R_o}{T - T_o} \quad (1.7)$$

Величину опору R_o визначити екстраполяцією прямої $R(t)$ до температури $t_o = 0$ $^\circ\text{C}$. Порівняти величину розрахованого температурного коефіцієнту опору α з табличним.

12. У разі використання термометра опору з напівпровіднику розрахувати для опорів їх логарифми $\ln R$ та побудувати рядом графіки $R(t)$ та графік $\ln R(t)$, який на невеликому інтервалі температур буде майже лінійним

13. Розрахувати середні значення похибок вимірювання температур Δt_{Xcp} для різних датчиків ($X = TP, TP, TO$).

$$\Delta t_{Xcp} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta t_{Xi}}{n}$$

У разі їх нульового значення ми маємо випадкові похибки. За наявності їх не нульового значення ми маємо систематичні похибки, які можуть бути пов'язані з похибками встановлення нуля термометру, з різною інерційністю датчиків, запізнюванням вимірів та ін. Визначити можливі причини систематичних похибок для ваших датчиків.

14. Оформити звіт за роботою і підготуватися до співбесіди за результатами її виконання.

Контрольні запитання

1. Що таке температура, що вона характеризує? Чому потрібно точно її знати?
2. Шкали температур, їх взаємозв'язок та одиниці вимірювання температур. Реперні точки температур та їх призначення.
3. Перерахуйте і стисло охарактеризуйте основні способи вимірювання температури, їхні переваги та недоліки.
4. Розкажіть, від чого залежить величина термо- ЕРС термопари, яка підключена безпосередньо до вимірювального приладу?
5. За якими параметрами ви визначили тип вашої термопари?
6. Якою є похибка вашого градуювання термопари, як її визначено?
7. Якою є похибка градуювання термометра опору, як її визначено?
8. Якою є похибка градуювання рідинного термометра, як її визначено?
9. Розкажіть як працюють цифрові термометри, які їх переваги та недоліки?
10. Систематичні і випадкові похибки вимірювання температури та їх величини.

ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПИТОМОЇ ТЕПЛОЄМНОСТІ ВІД ТЕМПЕРАТУРИ КАЛОРИМЕТРОМ ІЗ АДІАБАТНОЮ ОБОЛОНКОЮ

Теоретичний вступ

Всі фізичні, хімічні та біологічні процеси проходять із поглинанням або виділенням теплоти, тобто супроводжуються *тепловими* ефектами. До таких процесів також належать фазові перетворення, хімічні реакції, нагрів тіл та ін. Сукупність засобів вимірювання цих ефектів зветься калориметрією, а вимірювання проводяться з допомогою спеціальних приладів - калориметрів різноманітних конструкцій. Сучасні калориметри являють собою складні технічні прилади, які працюють у широкому діапазоні температур (від 0,1 до 4000 К) і мають високу точність (від декілька %). Дані калориметричних вимірювань широко використовуються у наукових дослідженнях та в інженерній практиці.

Під час інженерних розрахунків багатьох процесів, що пов'язані з передачею або відведенням теплоти, необхідне знання теплоємностей твердих, рідких і газоподібних речовин, у тому числі харчових продуктів. Тому інженери та фахівці, що спеціалізуються у галузі харчових виробництв, повинні володіти теоретичними основами і практичними навичками у проведенні вимірювань теплоємності та інтерпретації отриманих результатів.

Теплоємністю тіла C називається кількість теплоти, що необхідно підвести до *тіла* для підвищення його температури на 1 К. Якщо у інтервалі зміни температури ΔT кількість теплоти, що підводиться дорівнює Q , то згідно з визначенням *повна середня* (на інтервалі ΔT) теплоємність дорівнює

$$C = Q/\Delta T \text{ [Дж/К]}. \quad (2.1)$$

Істинною теплоємністю за даної температури T ($\Delta T \rightarrow 0$) називається похідна $C = dQ/dT$, що одержується при математичній обробці результатів вимірів.

Величина теплоємності залежить від багатьох чинників. Теплоємність тіла у першу чергу залежить від *кількості* речовини, що міститься у ньому. Залежно від одиниці, що використовується для вимірювання цієї кількості розрізняють *питому* (або масову) теплоємність c [Дж/(кг·К)] (тобто теплоємність 1 кг речовини), *мольну* (або молярну) теплоємність μc [Дж/(моль·К)] (теплоємність 1 моля речовини; до речі у літературі з теплотехніки поняття "моль" часто відповідає кілограм-молю речовини), яка дорівнює $\mu c = c \cdot \mu$, де μ - молярна маса речовини, *об'ємну* теплоємність c' [Дж/(м³·К)] (теплоємність 1 м³ речовини), яка дорівнює $c' = \rho \cdot c$ (ρ - густина речовини). В інженерній практиці найчастіше використовується питома

теплоємність c . Кількість теплоти, що необхідна для нагрівання тіла масою m на dT , дорівнює $dQ = m c dT$, а для 1 кг речовини $dq = c dT$.

Питома теплоємність речовини залежить від її фізичної природи і внутрішньої структури. Тому знання теплоємності речовини важливе не лише для інженерної практики, але і під час різноманітних наукових досліджень, пов'язаних зі з'ясуванням фізичних процесів, що протікають на атомно-молекулярному рівні. Теплоємність газів пов'язана зі збільшенням кінетичної енергії молекул при підвищенні температури. Найбільш детально розроблено теорію теплоємності ідеального газу (див. нижче). Теплоємність твердих тіл пов'язано зі збільшенням енергії теплових коливань атомів або іонів у вузлах кристалічної решітки при нагріві тіла. У металах істотний вклад у теплоємність, поряд з кристалічною решіткою вносять вільні електрони (електронний газ). Теплоємність рідин звичайно дещо більша від теплоємності відповідних твердих тіл, оскільки характер руху атомів при плавленні твердого тіла звичайно змінюється незначно.

Вода відрізняється від інших рідин цілою низкою аномалій фізичних властивостей, у тому числі стосовно до теплоємності: питома теплоємність води більша ніж у інших речовин і складає близько 4200 Дж/(кг К) при кімнатній температурі та приблизно вдвічі більша ніж у льоду та пари. Саме значним вмістом води з її високим значенням теплоємності c пояснюється висока теплоємність багатьох харчових продуктів (особливо м'ясних, рибних продуктів, овочів). Під час теплової обробці їхній вологовміст зменшується, і питома теплоємність відповідно значно спадає. Це слід враховувати під час розробки і розрахунку технологічних процесів у харчовому виробництві.

З проведеного стислого огляду видно, що вимірювання теплоємності є важливим засобом вивчення фазових і структурних перетворень речовини у наукових і технологічних дослідженнях.

Кількість теплоти dq , що необхідна для нагрівання 1 кг речовини на dT , та питома теплоємність c залежать також від умов нагрівання речовини (або від шляху теплового процесу). Ця залежність особливо помітно виявляється для газів. Так питома теплоємність газу c_v , що зміряна за сталого об'єму, менша за питому теплоємність за сталого тиску c_p , причому, за формулою Майєра, $c_p = c_v + R$ (де R - питома газова стала). Для рідких та твердих речовин під час наближених розрахунків вважають $c_v \approx c_p = c$.

Нарешті, питома теплоємність усіх реальних речовин тією чи іншою мірою залежить і від температури. Ця залежність буде відсутня тільки для гіпотетичної речовини – ідеального газу, теплоємність якого може бути розрахована на основі молекулярно - кінетичної теорії. Згідно з цією теорією, молярна теплоємність

$$\mu c_v = (i/2)R_\mu$$

де i – кількість ступенів свободи молекули газу, $R_\mu = 8314$ Дж/(кмоль К) – універсальна (мольна) газова стала. Кількість ступенів свободи молекули ідеального газу залежить від числа поступальних i_n та обертальних $i_{об}$ ступенів свободи.

Для *одноатомних* газів $i = i_n = 3$ (*He, Ne, Ar, пара Na, Hg*) $\mu c_v = 12,5$ кДж/(кмоль К), для *двоатомних* $i = 5$ (*H₂, N₂, O₂, повітря - суміш двоатомних газів*) $\mu c_v = 20,8$ кДж/(кмоль К), для *багатоатомних* $i = i_n + i_{об} = 3 + 3 = 6$ (*NH₃, CH₄, водяна пара H₂O, CO₂*) $\mu c_v = 25$ кДж/(кмольК). Для теплоємності c_p ідеального газу, згідно з формулою Майєра, маємо $c_p = c_v + R = R (i + 2)/2$.

Для реальних газів теплоємність зростає з температурою і може бути подана формулою вигляду $c = c_o + at + bt^2 + \dots$, де a, b - коефіцієнти, що визначаються дослідним шляхом, c_o - значення c за температури t_o , найчастіше $t_o = 0$ °С. За технічних розрахунків звичайно вважають $c = c_o + at$. Тоді для питомої теплоємності, що усереднена на інтервалі $t_1 \dots t_2$, $c_m \approx c_o + a(t_2 + t_1)/2$.

За наближених розрахунків часто можна взагалі не враховувати залежність c від t і застосовувати наведені вище формули ідеального газу. Так, для *повітря* ($\mu \cong 29,0$ кг/кмоль) знаходимо $c_v = 717$ Дж/(кг К), $c_p = 717 + 287 = 1004$ Дж/(кг К).

Для рідин і твердих тіл залежність $c(t)$ може мати складний вигляд, що погано піддається теоретичному розгляду (особливо для рідин). Для багатьох простих твердих тіл (*Cu, Fe* та ін.) з достатньою точністю виконується закон Дюлонга і Пті, згідно з яким атомна теплоємність дорівнює $\mu c = 3R_\mu \cong 25$ кДж/(кг-атом К) (роль "моля" при цьому виконує кілограм-атом речовини). Наприклад, для міді ($\mu = 64$ кг/кг-атом) $c = 25000/64 = 400$ Дж/(кг К), що добре погоджується з даними експерименту. Однак для більшості складних твердих тіл, наприклад сплавів, спостерігаються значні відхилення від закону Дюлонга і Пті.

Таким чином, питома теплоємність реальних речовин мало піддається теоретичному розрахунку і залежить від багатьох чинників, які часто невідомі. Тому значно надійнішим способом визначення теплоємності є застосування одного з численних експериментальних способів, що входять у спеціальну галузь науки і техніки – калориметрію.

Метою даної роботи є ознайомлення з одним із способів вимірювання теплоємності – за допомогою калориметра з адіабатною оболонкою.

Стислий опис приладу

У класичних калориметрах з *ізотермічною оболонкою* її температура підтримується сталою з дуже високою точністю (до $\pm 0,01$ К і вище). При цьому врахування теплообміну зразка з навколишнім середовищем (оболонкою) розраховується дуже точно. Такі прилади звичайно застосовують для дослідження теплових ефектів при порівняно швидких процесах (наприклад, горіння).

Для вимірювання питомої теплоємності звичайно застосовують калориметри з *адіабатною оболонкою*, у яких вимірювальна частина (калорична система) знаходиться у оболонці, температура якої автоматично

підтримується якомога ближче до температури вимірювальної частини (зразка). Це дозволяє спростити розрахунки, максимально зменшити тепловтрати у навколишнє середовище і завдяки цьому проводити тривалі дослідження, зокрема вимірювати питому теплоємність у широкому інтервалі температур.

Типовим представником калориметрів цього виду є вимірник теплоємності "ИТ-С-400". Він призначений для проведення масових досліджень питомої теплоємності твердих, сипких і рідких речовин у виробничих і лабораторних умовах в інтервалі температур від $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (при застосуванні рідкого азоту) до $+400\text{ }^{\circ}\text{C}$ з кроком $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ та точністю не нижче 10 %.

В основу роботи приладу покладено порівняльний спосіб динамічного калориметра з *тепломіром* і *адіабатною оболонкою*, спрощена теплова схема способу подана на рис. 2.1. Зразок матеріалу, що досліджується 1 розміщується у металевій ампулі 2 з кришкою 3. Через тепломір 4 до ампули безупинно надходить тепловий потік Q від основи 5, у якій змонтовано нагрівач. Відкриті краї ампули ізолювано від навколишнього середовища адіабатною оболонкою 6 (охоронним ковпаком), що нагрівається також до температури ампули. Перепад температур ($\Delta T = t_1 - t_2$) на тепломірі вимірюється хромель - алюмелієвими термопарами 7.

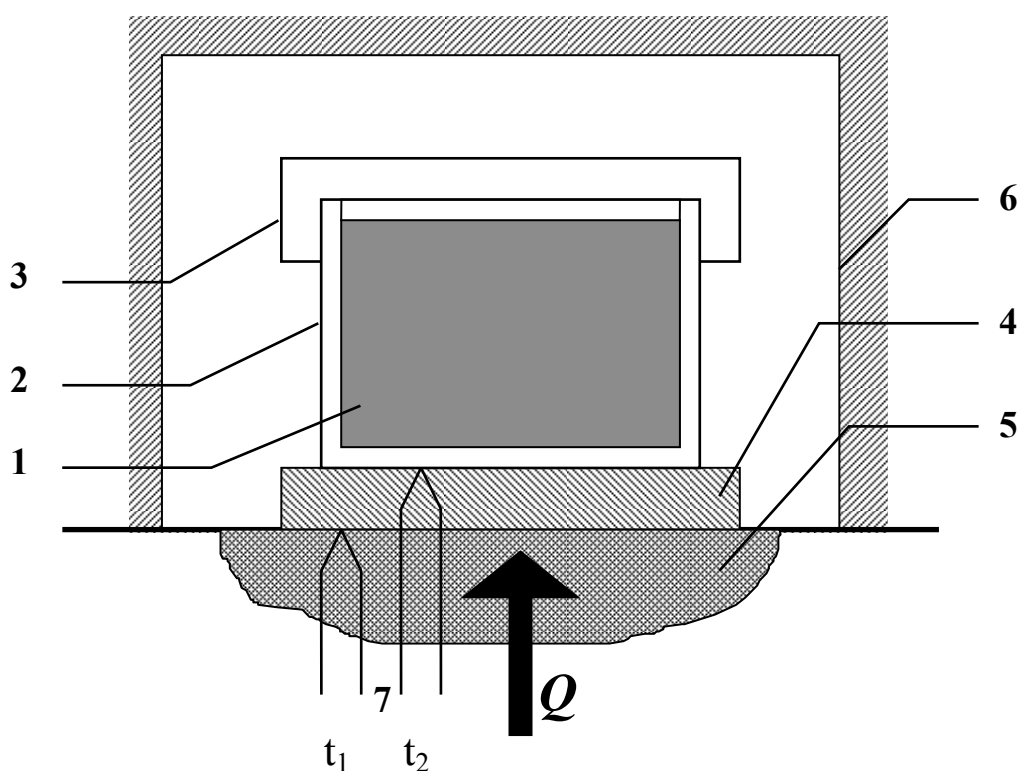


Рисунок 2.1. Теплова схема калориметра

Принцип дії приладу полягає у тому, що до зразка у вимірювальному блоці через тепломір від нагрівача безупинно надходить сталий тепловий

потік Q , що йде на нагрівання контейнера (ампули) разом зі зразком (рис. 2.1).

$$Q = Q_o + Q_a = (c m + C_a)b, \quad (2.2)$$

де $Q_o = c m b$, c – питома теплоємність матеріалу зразка, Дж / (кг К);
 m – маса зразка, кг (визначається зважуванням);
 $Q_a = C_a b$, C_a – повна теплоємність ампули і тепломіру, Дж / К
 b – швидкість нагрівання зразка і ампули за часом τ , ($b = dT/d\tau \approx 0,1$ К/с).

Це створює на тепломірі з тепловою провідністю K_m згідно із законом теплопровідності Фур'є температурний перепад $\Delta T = Q/K_m$ ($K_m = \lambda/\delta$ - стала приладу, λ - коефіцієнт теплопровідності, δ - товщина тепломіру). За сталого темпу нагрівання b на тепломірі у вимірювальному блоці встановлюється час запізнювання τ температури зразка t_2 відносно температури основи t_1 . Величина запізнювання температури зразка $\Delta T = t_1 - t_2$ може бути розрахована за часом запізнювання τ температури на тепломірі, як $\Delta T = b \tau$. Величина часу запізнювання τ вимірюється під час досліду безпосередньо за допомогою секундоміра. Розрахункова формула для питомої теплоємності c зразка масою m має вигляд

$$c = K_m (\tau - \tau_o) / m, \quad (2.3)$$

де τ_o відповідає часу запізнювання при порожній ампулі (без зразка). Величини K_m і τ_o є сталими приладу і визначаються у процесі його градування. Єдиною величиною, що вимірюється у роботі, є час запізнювання τ температури t_2 від t_1 .

Прилад "ИТ-С-400" складається з наступних блоків :

- вимірювального (верхнього) блоку, що містить блок зі зразком, адіабатну оболонку і вимірювальні термомари;
- блоку живлення і регулювання (нижнього блоку), схему живлення, що містить системи керування нагрівачем, які забезпечують заданий темп нагріву вимірювального блоку приладу.

Крім того, невід'ємними частинами вимірювальної установки є:

- микровольтнаноамперметр Ф-136, що підключений до вимірювального блоку приладу "ИТ-С-400" як нуль - прилад, який фіксує момент проходження температури блоку t_1 або t_2 через задане її значення [$t_1(0) = t_2(\tau)$];
- електричний секундомір для вимірювання часу запізнювання τ .

Під час подачі живлення на нагрівач ядро вимірювального блоку зі зразком починає монотонно нагріватися зі сталою швидкістю b , приблизно 0,1 К/с. Водночас із цим допоміжний нагрівач у адіабатній оболонці підтримує нульову різницю температур між ампулою зі зразком і оболонкою (адіабатні умови). Внаслідок нагрівання риска світлового індикатора температури приладу Ф-136 починає рівномірно переміщатися по шкалі справа наліво. У момент її проходження через нуль температура на тепломірі (t_1 або t_2) відповідає встановленій на перемикачі "ТЕМПЕРАТУРА, °С". За допомогою перемикача "ИЗМЕРЕНИЕ" і секундоміра вимірюється час запізнювання τ температури ампули зі зразком (t_2) у порівнянні з температурою основи (t_1) [за сталої температури вимірювання $t_{\text{вим}} = t_1(0) = t_2(\tau)$]. Можна також сказати, що за час τ зразок нагрівається за температурою на величину $\Delta T = t_1 - t_2$. Зміряне значення часу τ підставляється у формулу (2.3).

Порядок виконання вимірювань

Як об'єкт вимірювань у даній роботі використовується зразок високотемпературного сплаву ВТ-6 або інший з невідомою величиною і залежністю питомої теплоємності від температури. Вимірювання проводяться у інтервалі температур 25... 225 °С у наступному порядку:

1. Ознайомитися з приладом, принципом його дії та порядком виконання роботи. Отримати допуск до роботи. Перевірити правильність і надійність підключення з'єднувальних кабелів до приладу.

2. Встановити *початкові положення* ручок приладу:

Вимикач "СЕТЬ" на блоці живлення і на приладі Ф-136, а також вимикач "НАГРЕВ" на блоці живлення - у положення "ВІКЛ." (висунуте положення клавіш), перемикач "ИЗМЕРЕНИЕ" на вимірювальному блоці - у положення "Уст. 0", перемикач "ТЕМПЕРАТУРА, °С" – у положення "25 °С". Перевірити встановлення захисту приладу Ф-136 на "App" (натиснуте положення клавіші).

3. Зважити зразок на аналітичних вагах з точністю на гірше $\pm 0,01$ г. Підняти верхню частину вимірювального блоку (охоронний ковпак), встановити зразок у ампулу, закрити його кришкою та опустити верхню частину вимірювального блоку у робоче положення.

4. Увімкнути вимикачі " СЕТЬ " на блоці живлення, приладі Ф-136 і секундомірі та дати приладам прогрітися протягом 10...15 хв. За цей час підготувати таблицю результатів вимірювань, перевірити роботу секундоміра.

5. Розаретувати прилад Ф-136 (відтиснути клавішу "App.") і перевірити встановлення rischi світлового показчика на нуль. Встановити за вказівкою викладача зручний діапазон вимірювань (100 або 250 мкВ). Стежити, щоб світловий показчик приладу не виходив за межі шкали.

6. Перевести перемикач "ИЗМЕРЕНИЕ" у положення " t_1 ", при цьому світловий показчик повинен відійти праворуч від нуля шкали (якщо він відійде ліворуч, то температура основи вища за 25 °С. Тоді потрібно встановити перемикач "ТЕМПЕРАТУРА, °С" на наступне значення "50 °С" і продовжити вимірювання, як описано нижче, але заповнення таблиці почнеться з рядка "50 °С".

7. Встановити початкову напругу 40 ± 2 В за шкалою вольтметра на блоці живлення. Включити клавішею "НАГРЕВ" основний нагрівач і при цьому світловий показчик приладу Ф-136 почне переміщатися ліворуч по шкалі, а через деякий час включиться світловий індикатор "РАБОТА РЕГУЛЯТОРА" адіабатної оболонки на вимірювальному блоці.

8. У момент проходження риски світлового індикатора приладу Ф-136 через нуль шкали включити секундомір і перевести перемикач "ИЗМЕРЕНИЕ" у положення " t_2 ", при цьому світловий показчик відійде праворуч ($t_1 > t_2$). У момент його повторного проходження через нуль вимкнути секундомір. Занести значення τ у табл. 2.1 і повернути перемикач у положення " t_1 ". [Надалі повторювати вимірювання за нових температур також при "+30" і "-30" поділках приладу Ф-136, результати вимірювань за цих трьох температур у табл. 2.1 усереднити].

9. Повторювати вимірювання разом зі зростанням температури зразка, послідовно переміщуючи перемикач "ТЕМПЕРАТУРА, °С" на 50, 75, ... 225 °С, та занести результати у табл. 2.1. Щоб не змінювати високу чутливість приладу Ф-136, переключення перемикача "ТЕМПЕРАТУРА, °С" робити відразу після зникнення світлового показчика індикатора ліворуч за межі шкали.

10. По закінченні вимірювань перевести перемикач "ИЗМЕРЕНИЕ" у положення "Уст. 0", встановити прилад Ф-136 на аретир (натиснути клавішу "App."), відновити всі початкові положення ручок згідно п. 2 та вимкнути всі прилади. Обережно підняти верхню частину вимірника установки (охоронний ковпак) та повернути її ліворуч для фіксації та охолодження.

11. Обчислити значення теплоємності c за формулою (2.3), використовуючи наведені значення сталих приладу за даних температур K_m і τ_0 , записати їх у табл. 2.1. Визначити похибку вимірювань Δc , яка дорівнює 10 % c . Побудувати графік залежності $c(t)$.

12. Оформити звіт і підготуватися до співбесіди за результатами роботи.

Результати вимірювань теплоємності

$t, ^\circ\text{C}$	$K_m, \text{Дж/К}$	$\tau_o, \text{с}$	$\tau, \text{с}$	$c, \text{Дж/(кг К)}$	$\Delta c, \text{Дж/(кгК)}$
25	0.33	13.5			
50	0.34	12.4			
75	0.35	11.4			
100	0.36	10.4			
125	0.37	9.6			
150	0.38	9.0			
175	0.39	8.4			
200	0.40	8.0			
225	0.405	7.7			

Примітка: Значення сталих приладу K_m і τ_o можуть бути уточнені під час чергового калібрування установки та відрізняються для різних установок.

Контрольні запитання

1. Що таке теплоємність? Охарактеризувати її сенс.
2. Охарактеризувати види теплоємності та розмірність залежно від кількості речовини і процесу.
3. Теплоємності c_v і c_p . Рівняння Майєра для 1 кг і 1 кмоль речовини.
4. Залежність теплоємності c_v від роду ідеального газу та сталої R .
5. Залежність теплоємності від температури та її розрахунок.
6. Принцип роботи адіабатного калориметра. Теплова схема роботи приладу.
7. Адіабатна оболонка та її призначення. Як досягаються адіабатні умови у калориметрі ?
8. Що таке час запізнювання, чому він спостерігається та як він вимірюється?

ВИВЧЕННЯ ІЗОХОРНОГО ПРОЦЕСУ

Теоретичний вступ

Ізопроееси (ізохорний, ізобарний, ізотермічний та адіабатний) - це найбільш поширені реальні процеси, що відбуваються у різних технічних та технологічних процесах та апаратах.

Ізохорний процес - це процес, що проходить за незмінного об'єму ($v = \text{const}$). Він, як і інші ізопроееси, також є окремим випадком політропного процесу, який проходить за сталої теплоємності ($c = \text{const}$). Особливість ізохорного процесу полягає у тому, що для цього процесу теплоємність $C = C_v$ та показник політропи $n = (c_p - c)/(c_v - c) \rightarrow \infty$. Виведемо цю умову з рівняння політропного процесу:

$$p v^n = \text{const} \quad (3.1)$$

Дійсно, формулу (3.1) можна уявити у вигляді:

$$v^n = \text{const} / p \quad \rightarrow \quad v = \text{const} / p^{1/n} \quad (3.2)$$

За умови $n \rightarrow \infty$: $p^{1/n} \rightarrow p^0 = 1$ і тоді з рівняння (3.2) одержимо: $v = \text{const}$, що відповідає назві процесу. З іншої формули політропного процесу для температури за $n \rightarrow \infty$ слідує:

$$T = \text{const} \cdot p^{(n-1)/n} = \text{const} \cdot p^{1-1/n} \quad (3.3)$$

Що при $n \rightarrow \infty$ $p^{1-1/n} \rightarrow p^{1-0} = p$, тобто $p/T = \text{const}$ або

$$p_2 / p_1 = T_2 / T_1 \quad (3.4)$$

Формула (3.4) описує основний закон для ізохорного процесу – *закон Шарля*. Оскільки у даному процесі $v = \text{const}$, то робота не виконується: $dl = p dv \equiv 0$. Тоді перший закон термодинаміки для цього процесу набуває вигляду:

$$q = l + \Delta u = \Delta u = u_2 - u_1 \quad (3.5)$$

Таким чином, теплота, що передається термодинамічній системі в ізохорному процесі, повністю витрачається на збільшення внутрішньої енергії системи з підвищенням її температури. Аналогічно під час відведення теплоти температура системи знижується. Зміну питомої внутрішньої енергії можна описати також через теплоємність:

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1) \quad (3.6)$$

Величину питомої теплоємності за сталою об'єму c_v можна наближено розрахувати на основі молекулярно – кінетичної теорії ідеального газу (див.

опис лабораторної роботи ТД- 2). Так для двоатомних газів і повітря ця теорія дасть:

$$c_v = 20,8 / \mu \text{ кДж/(кг К)} \quad (3.7)$$

Для повітря із $\mu \cong 29$ кг/кмоль ця формула дасть $c_v = 717$ Дж/(кг К). Це значення використовується у наближених термодинамічних розрахунках c_v , коли температурну залежність теплоємності C_v не враховують.

Для інших ізопроцесів зміни термодинамічних параметрів можна розрахувати за наступними універсальними формулами (де $\Delta T = T_2 - T_1$, m - маса тіла) та з урахуванням даних та рівнянь, що наведені у табл. 3.1.

Таблиця. 3.1

Основні формули та параметри ізопроцесів

Процес	<i>Ізотермічний</i>	<i>Ізобарний</i>	<i>Ізохорний</i>	<i>Адіабатний</i>
Умова процесу	$T = const$	$p = const$	$V = const$	$Q = 0$ ($S = const$)
c	$\pm \infty$	c_p	c_v	0
n	1	0	$\pm \infty$	$k = c_p/c_v$
Зв'язки параметрів та їх закони	$p_2/p_1 = v_1/v_2$	$v_2/v_1 = T_2/T_1$	$p_2/p_1 = T_2/T_1$	$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$
	<i>Бойля-Маріота</i>	<i>Гей – Люсака</i>	<i>Шарля</i>	<i>Рівняння адіабати (Пуасона)</i>

Універсальні формули для політропного процесу:

внутрішня енергія	$\Delta U = m c_v \Delta T$;
ентальпія	$\Delta H = m c_p \Delta T$;
ентропія	$\Delta S = m c \ln(T_2/T_1)$;
теплота	$\Delta Q = m c \Delta T$;
робота	$L = m R \Delta T / (n-1)$. (3.8)

Метою даної лабораторної роботи є експериментальна перевірка закону Шарля (3.4), а також обчислення питомої внутрішньої енергії газу (повітря) за формулою (3.6) з урахуванням (3.7) (див. п.п. 9 і 10).

Експериментальна установка

Схему лабораторної установки подано на рис. 3.1.

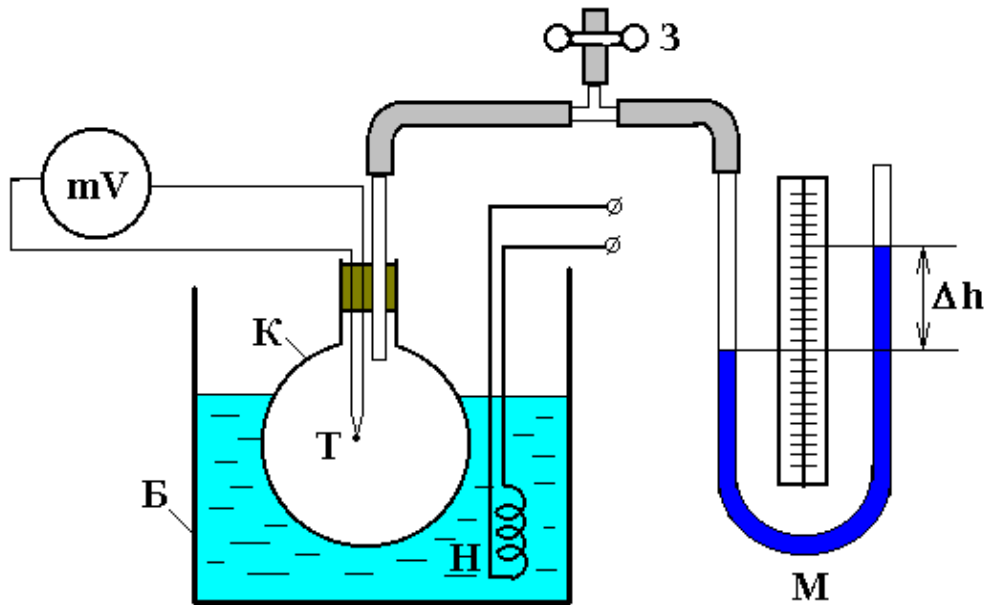


Рисунок. 3.1 Експериментальна установка

Колба К, що закрита гумовою пробкою, поміщена у водяну баню Б з нагрівачем Н, живлення якого здійснюється від електромережі. Через пробку у колбу введені термопара Т для вимірювання температури у ньому і патрубок для сполучення об'єму колби з рідинним манометром М для вимірювання надлишкового тиску повітря у колбі. На з'єднуючій трубці знаходиться трійник із затискувачем З, що дозволяє вирівнювати рівні рідини у манометрі на початку вимірювань. Відлік показань (термо – ЕРС) термопарі здійснюється за допомогою мілівольтметра або потенціометра, а відлік надлишкового тиску p - за шкалою манометра у мм ртутного стовпа, які перераховується в системі СІ у Па або у бари. Визначення температури повітря у колбі робиться за даними градування термопарі. Температура повітря у приміщенні (вільного/холодного спаю термопарі) визначається за даними лабораторного термометра.

Після включення нагрівача температура водяної бані поступово підвищується, що зумовлює нагрів повітря у колбі К за сталого об'єму, при цьому тиск повітря у колбі також зростає. Підвищення тиску і температури повітря у колбі повинне здійснюватися достатньо поволі, для того щоб стан газу у моменти вимірювання був якомога ближче до рівноважного. Для досягнення цієї мети можна підняти колбу з бані Б на деяку висоту, що забезпечує більш повільне нагрівання або охолодження колби з повітрям у парі гарячої води.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з лабораторною установкою, звертаючи основну увагу на використання вимірювальних приладів. Перевірити цілісність усіх трубок та сполучень у установці та наявність достатньої кількості води у водяній бані. Закрити затискувач З на трубці манометра.

2. Заміряти і записати показання лабораторного термометра. Атмосферний тиск виміряти барометром (p_{am} вимірюється у мм рт. ст., де 1 мм рт. ст. = 133,3 Па) та перерахувати у Па (див. п.5).

3. Включити нагрівач водяної бані і спостерігати зміну показань мілівольтметра E і манометра Δh з часом. Занести заміряні значення Δh та E до табл. 3.2. Записати показання не менше ніж у 10 ... 15 експериментальних точках - приблизно через 10... 15 мм рт. ст.

4. Після досягнення максимальної температури (95... 100 °С) і показань манометра Δh записати отримані результати та припинити нагрівання води. Спостерігати за зниженням тиску повітря у колбі під час його охолодження, чи співпадають точки нагріву та охолодження. По закінченні вимірювань відкрити затискувач З на трубці манометра.

5. Визначити за допомогою таблиці градування термопари зростання температури повітря у колбі Δt над кімнатну t_k ($\Delta T = \Delta t = t - t_k$) (див. додаток 3), розрахувати величину тиску у колбі ($p = \rho g \Delta h$, де густина ртуті $\rho = 13600 \text{ кг/м}^3$) і записати до табл. 3.2.

6. Врахувати, що відповідно до закону Шарля (3.4) при $p_1 = p_{am}$, $T_1 = T_k$, $p_2 = p_{am} + \Delta p$ і $T_2 = T_k + \Delta T$, з $(p_{am} + \Delta p)/p_{am} = (T_k + \Delta T)/T_k$ маємо: $p/p_{am} = \Delta T/T_k$, звідки для відношення $p/\Delta T$ (де $p \equiv \Delta p$) отримаємо його *теоретичне* значення:

$$p/\Delta T = p_{am}/T_k = const. \quad (3.9)$$

7. Обчислити значення $p/\Delta T$ і записати до табл. 3.2. Перевірити точність дотримання закону Шарля за теоретичною формулою (3.9) в умовах досліду; при низькій точності подумати про можливі причини цього явища.

8. Побудувати графік залежності тиску p від величини нагріву повітря у колбі ΔT .

9. Визначити, з якою точністю (поділ./К) можна вимірювати температуру повітря за допомогою даної установки як газового термометра, оснований на законі Шарля. А в разі заміни ртуті водою?

10. Обчислити зміну питомої внутрішньої енергії повітря при нагріванні за формулою (3.6), якій придамо вигляду: $\Delta u = c_v \Delta T = 717 \Delta T$ (Дж/кг). Занести результати до табл. 3.2.

11. Визначити зміну внутрішньої енергії повітря ($\Delta U = m \Delta u$) у колбі, вважаючи її сферою діаметром 12 см. Маса повітря у колбі знайти з рівняння Клапейрона ($p V = m R T$) та об'єму кулі ($V = \pi d^3/6$).

12. Оформити звіт за роботою і підготуватися до співбесіди за результатами її виконання.

Таблиця 3.2

Таблиця вимірювань

№	Δh , мм	p , Па	E , mV	ΔT , К	$p/\Delta T$, Па/К	Δu , Дж/кг
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						

Контрольні запитання

1. Що таке політропний процес? Наведіть рівняння процесу.
2. Що таке ізохорний процес, і які його основні особливості?
3. Внутрішня енергія тіла та її розрахунок.
4. Які ізопроцеси ви знаєте? Охарактеризуйте їх та наведіть рівняння процесів.
5. Як вимірюється тиск повітря у колбі ?
6. Які похибки виникають під час вимірів тиску?
7. Закон Шарля, вивести загальну і робочу формули.
8. Що у отриманих вами результатах доводить про виконання закону Шарля?

ВИВЧЕННЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ТЕМПЕРАТУРИ КИПІННЯ ВОДИ ВІД ЗОВНІШНЬОГО ТИСКУ

Теоретичний вступ

Під час нагрівання рідина звичайно знаходиться під сталим *зовнішнім* тиском, утворення *пари* спочатку носить "спокійний" характер і відбувається лише з вільної (зовнішньої) поверхні рідини - такий процес пароутворення називається *випаровуванням*. По досягненні певної температури процес пароутворення набуває, "неспокійного" бурхливого характеру – це явище називається *кипінням* рідини і являє собою особливий вид процесу пароутворення.

Кипінням називається *процес пароутворення у рідині, яка знаходиться при температурі насичення* (або дещо перегрітої відносно цієї температури) з утворенням *бульбашок (пузирів) пари*. Процес пароутворення при цьому йде не тільки з зовнішньої поверхні нагрівача, але й у *всьому об'ємі рідини* (з внутрішньої поверхні пузирів). Доки бульбашки пари підіймаються через рідину їх об'єм зростає у декілька разів. Процес супроводжується підведенням теплоти, необхідної для фазового переходу рідини у пару, що називається **теплотою пароутворення**.

Над поверхнею рідини має місце динамічна рівновага між випаровуванням рідини і зворотним процесом – конденсацією пари і при цьому на поверхню рідини діє рівноважний тиск *насиченої пари* $p_{\text{нп}}$. Цей тиск досить швидко (\approx експоненційно) зростає із температурою (рис. 4.1).

Для того *щоб розпочався* процес кипіння, у рідині повинні бути *зародки* нової *газоподібної* фази – *бульбашки пари* або газу, що найчастіше при кипінні утворюються на поверхні нагріву (більш перегрітої). Звичайно рідина не буває абсолютно чистою і однорідною – у ній є розчинений газ, а на стінках присутні бульбашки газу, які напочатку кипіння хоча і бувають дуже малі, але потрібні як зародки нової газоподібної фази. Розглянемо, як змінюється поведінка парової бульбашки біля точки кипіння рідини.

За температури кипіння $t_{\text{кип}}$ тиск насиченої пари $p_{\text{нп}}$ досягає значення зовнішнього тиску $p_{\text{зов}}$ (рис. 4.1) і парова бульбашка буде знаходитися у стані рівноваги між зовнішнім та внутрішнім тисками в неї та не зникає. За температурою, яка менша за температуру кипіння $t_{\text{кип}}$, тиск насиченої пари $p_{\text{нп}}$ буде також меншим і зовнішній тиск бульбашку знищить, тому що при $p_{\text{зов}} > p_{\text{нп}}$ вся надлишкова пара ($p_n > p_{\text{нп}}$) буде миттєво конденсуватися (явище кавітації). Навпаки, якщо температура рідини t' більша за температуру кипіння $t_{\text{кип}}$, тиск насиченої пари $p'_{\text{нп}}$ буде також більшим. Цей більший тиск

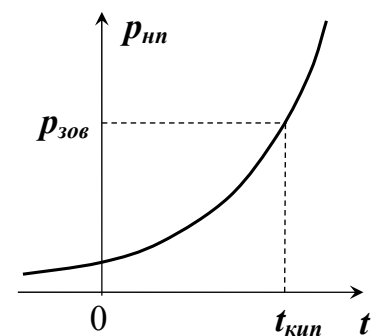


Рисунок 4.1

буде вести до того, що бульбашка буде розширюватися до тиску $p_{зов}$. Однак цей процес не одноразовий і не припинюється, тому що пара з тиском $p_n = p_{зов}$ буде *ненасиченою*. Це означає, що пара у бульбашці буде інтенсивно випаровуватися та її розміри будуть зростати, доки до неї підводиться тепло та температура рідини більша за $t_{кип}$.

Тиск усередині бульбашки дорівнює тиску насиченої пари даної рідини $p_{нп}$. Тиск іззовні бульбашки дорівнює сумі зовнішнього тиску $p_{зов}$, гідростатичного тиску p_z стовпчика рідини над бульбашкою ($p_z = \rho gh$, де ρ – густина рідини, h – висота її рівня над бульбашкою) і капілярного тиску p_k , зумовленого силами поверхневого натягу та кривизною поверхні рідини ($p_k = \sigma / R$, де R – радіус бульбашки, σ – коефіцієнт поверхневого натягу). Кількісні оцінки показують, що у воді звичайно p_z та $p_k \ll p_{зов}$, і тому умова рівноваги бульбашки (механічна) має вигляд $p_{нп} \geq p_{зов}$. Ця умова наближено відповідає *мінімальній умові кипіння*:

$$p_{нп} \cong p_{зов} \quad (4.1)$$

Спочатку ця *необхідна умова* кипіння виконується біля *стінки нагріву*, оскільки температура стінки буде вищою, ніж у рідини ($t_c > t_p$). Під час кипіння рідини ця умова виконується вже у всьому об'ємі рідини, а також спостерігається незначне (порядку 0,1...0,4 К) перегрівання всієї рідини. Тож бульбашка швидко зростає, а після досягнення “відривного” діаметру d_o відривається від стінки і спливає вгору, причому процес випаровування рідини продовжується і об'єм бульбашки продовжує помітно зростати (у 3...10 разів) під час її підйому через перегріту рідину. Це *випаровування у всьому об'ємі* рідини виявляють як її кипіння. На поверхні рідини бульбашки руйнуються з шумовим ефектом кипіння. Відзначимо, що шум кипіння з'являється вже у недогрітій рідині за рахунок кавітації (схлопування) бульбашок пари, що з'явилися у пристінному шарі біля нагрівача, де рідина вже кипить, а потім опинилися в “холодній” воді, де $p_{нп} < p_{зов}$.

З викладеного походить, що кипіння можливе лише за наявності всередині рідини бульбашок газу або пари, що є зародками нової газоподібної фази – пари (*достатня умова*). Якщо ж рідина фізично однорідна (без бульбашок – після кипіння та охолодження, коли всі бульбашки пари зникають), то кипіння стає неможливим. Появі бульбашок перешкоджає капілярний тиск, який особливо великий для дуже малих бульбашок. Таку рідину можливо нагріти вище за температуру кипіння, іноді на 10...30 °С, при заданому зовнішньому тиску і вона буде знаходитися у перегрітому стані. Із зазначеної вище умови настання кипіння (4.1) видно, що перегріта рідина знаходиться у нерівноважному стані: при появі бульбашок пари рідина відразу переходить у стан кипіння, що супроводжується дуже бурхливим закипанням та наступним зниженням температури до нормальної $t_{кип}$. Звичайно зародки бульбашок з'являються біля поверхні нагріву, де температура перегрітої рідини найвища.

За незмінного зовнішнього тиску температура киплячої рідини залишається сталою протягом усього процесу кипіння. Теплота, яка

підводиться до рідини у цьому ізотермічному процесі, повністю йде на пароутворення, тобто на здійснення роботи проти сил молекулярного зчеплення і зовнішнього тиску, що перешкоджають випаровуванню. З підвищенням зовнішнього тиску температура кипіння рідини також зростає, оскільки відповідає температурній залежності тиску насиченої пари $p_{\text{нп}}(t)$ (Рис. 4.1). Таким чином, *графік кривої кипіння $t_{\text{кп}}(p_{\text{зов}})$ водночас є і графіком залежності $p_{\text{нп}}(t)$* . Побудова цього графіка на основі експериментальних даних є **метою** даної роботи (надалі $p_{\text{зов}}$ і $p_{\text{нп}}$ позначені однією літерою p).

Розглянемо поведінку газової бульбашки, яка під час нагрівання рідини є зародком для наступної парової бульбашки. Тиск усередині бульбашки складається з тисків газу p і насиченої пари $p_{\text{нп}}$, що знаходяться у ній: ($p + p_{\text{нп}} = p_{\text{зов}}$). Ця бульбашка, на відміну від парової, не може зникнути під час охолодження рідини нище $t_{\text{кп}}$, тому що в ній є газ. З підвищенням температури тиск насиченої пари $p_{\text{нп}}$ швидко зростає, і бульбашка починає розширюватися, хоча парціальний тиск газу p у ній зменшується. Водночас при цьому зростає виштовхувальна сила і при досягненні відривного діаметру d_0 бульбашка відривається від стінки посудини і спливає, залишаючи на стінці малий зародок нової бульбашки, причому газу в ній залишається все менше, тобто тиск газу p у бульбашці при кипінні буде швидко зменшуватися і $p \ll p_{\text{нп}}$. Таким чином, кипіння настане за тієї ж умови (4.1).

Отримаємо теоретично рівняння кипіння. Для *реальних газів*, які можуть переходити у рідкий стан, опис їх стану ускладнюється внаслідок необхідності врахування *взаємодії між молекулами* та їх *власного об'єму*. Найпростіше рівняння стану - рівняння Ван-дер-Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right) \cdot (v - b) = RT, \quad (4.2)$$

де a і b - сталі. Це рівняння 3-го ступеня відносно до v (див. рис. 4.2) ізотерми якої ($abcd$ - при T_1) мають складну залежність та у області малих тисків і температур мають 3 корені, з'єднуючи які (b, e, c) одержимо прямі насичення bc - фазового переходу (випаровування або конденсації). Якщо з'єднати всі точки (корені) всіх ізотерм ($T_1 > T_2 > T_3$ та інші), то одержимо ділянку вологої пари LKM, де лівіше лінії LK- ділянка рідини, правіше KM- ділянка сухої пари. Всередині ділянці LKM ізотерми та ізобари співпадають. Найвища точка K - критична - вище неї немає різниці між рідиною та паром, тому що у ній та вище теплота пароутворення дорівнює нулю.

Залежність кривої кипіння $p_{\text{нп}}(t)$ (рис. 4.1) може бути розрахована теоретично на основі рівняння Клапейрона - Клаузіуса:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{r}{T(v'' - v')}, \quad (4.3)$$

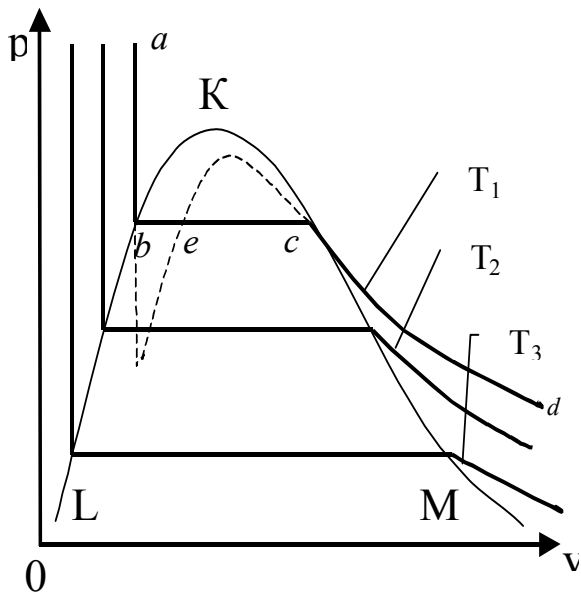


Рисунок 4.2 Ізотерми Ван-дер-Ваальса

де r - питома теплота пароутворення, T - температура насичення – фазового переходу рідина – пар, v' – питомий об'єм рідини та v'' – питомий об'єм пари за температури насичення. При інтегруванні цього рівняння вважатимемо що поблизу точки плавлення величина r не залежить від температури, а $v' \ll v'' = v$ та виконується рівняння Клапейрона $p \cdot v = R \cdot T$, або $v = R T / p = R_{\mu} T / (p \cdot \mu)$, де $R_{\mu} = 8314$ Дж/(кмоль·К) – універсальна (мольна) газова стала, $\mu = 18$ кг/кмоль – молекулярна маса води.

Тоді отримаємо рівняння:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{p r}{R \cdot T^2}, \quad \text{або} \quad \frac{dp}{p} = \frac{r dT}{R T^2}.$$

Його інтегрування дає рівняння, що відповідає рис. 4.1:

$$\ln p = -\frac{r}{R} \frac{1}{T} + C \quad (4.4).$$

Сталу інтегрування можна знайти, якщо відомий тиск насиченої пари $p_{nn} = p_o$ за будь-якої температури T_o (найчастіше це точка плавлення T_{nn} або потрійна T_n). Остаточно отримаємо залежність $p(T)$:

$$p = p_o \exp \left[\frac{\mu r}{R_{\mu}} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_o} \right) \right].$$

З формули (4.4) бачимо, що графік залежності $p(T)$, побудований у вигляді $\ln p = f(1/T)$, повинен являти собою пряму лінію з від'ємним нахилом, величина якого (тангенс нахилу) дорівнює $\Delta(\ln p) / \Delta(1/T) = -r/R$.

Оскільки величини μ і R_{μ} відомі, то за величиною осередненого нахилу прямої лінії на графіку $\ln p = f(1/T)$, де $\Delta X = X_2 - X_1$, $X = \ln p$, $1/T$ можна визначити осереднену величину питомої теплоти пароутворення r на робочому інтервалі температур даної роботи:

$$r = -R \cdot \frac{\Delta \ln p}{\Delta \left(\frac{1}{T} \right)} = -\frac{R_{\mu}}{\mu} \cdot \frac{\Delta \ln p}{\Delta \left(\frac{1}{T} \right)}. \quad (4.5)$$

Експериментальна установка

Схема експериментальної установки показана на рис. 4.3. Посуд із водою знаходиться на вакуумній тарілці та накритий ковпаком К. У ньому знаходиться нагрівач Н та датчик температури Т. На крані Кр є стрілка, положення якої показує напрям відкачування (стрілку повернуто до насосу) і положення напускання атмосферного повітря (поворот стрілки на 180°). Тиск під ковпаком контролюється манометром (вакуумметром) М. Момент закипання визначається візуально за постійною появою великих бульбашок, що доходять до поверхні води. Для побудови експериментальних графіків $t_{\text{кип}}(p)$ та $\ln p = f(1/T)$ необхідно мати не менше 10...12 експериментальних точок (див. табл. 4.1).

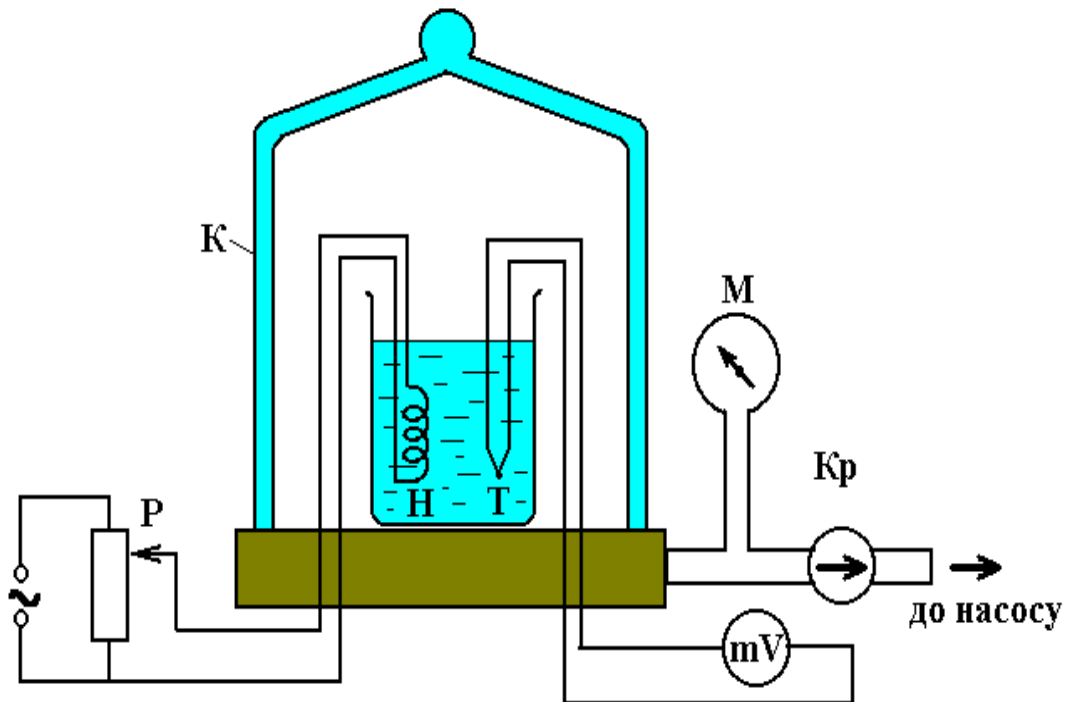


Рисунок 4.3. Схема експериментальної установки

Порядок виконання роботи

1. Підготувати установку до роботи. Налити у посудину води на $2/3$ її об'єму, опустити у неї нагрівач і термометр опору. Ретельно протерти паз вакуумної тарілки, гумову ущільнювальну прокладку і краї ковпака вогкою тканиною. Протерти внутрішню поверхню ковпака сухою тканиною. Встановити кран Кр у положення "відкачування" (стрілкою до насоса). Встановити ковпак на вакуумну тарілку разом із посудиною з водою, що знаходиться на ній.

2. Включити вакуумний насос та відкачати об'єм під ковпаком до закипання води або до $p_{\text{вак}} \approx -1$ ат (нуль на шкалі манометра відповідає атмосферному тиску $p_{\text{ат}}$, а $p_{\text{вак}} \approx -1$ ат – досить глибокому вакууму – див. далі п. 3).

3. Виміряти барометром атмосферний тиск $p_{атм}$ та перерахувати його у бари $p_{атм}$. Визначити абсолютний тиск під ковпаком (технічна атмосфера: 1 ат = 0,981 бар, 1 мм рт. ст. = 133,3 Па, 1 бар = 10^5 Па = 100 кПа \cong 750 мм рт. ст.):

$$p = p_{вак} + p_{атм} = p_{атм} + p_{вак} \cdot 0,981 \text{ бар}, \quad p_{атм} = (p_{атм} / 750) \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

4. Включити нагрівач Н. Стежити за підвищенням температури у посудині за показаннями термометра опору (по мосту опору, врівноваживаючи перемикачами його гальванометр на нульове значення – див. Додаток 5) і за станом води у посудині. По досягненні стану кипіння (великі бульбашки, що підіймаються до поверхні води) та витримки 1 хвилини для прогріву об'єму датчику термометру та записати показання перемикачів мосту опору у табл. 4.1. Перед вимірюванням перевірити величину $p_{вак}$ за необхідності відкачати повітря під ковпаком насосом до необхідного значення.

5. Обережно повертати кран Кр поблизу положення запуску повітря під ковпак (стрілкою до ковпака) до початку проходження повітря ззовні під ковпак (встановлюється за звуком і зміщенню стрілки манометра). Після підвищення тиску під ковпаком до $-0,95$ ат, знов закрити кран (повернути на 180°). Звернути увагу на негайне припинення кипіння рідини. Спостерігати за підвищенням температури рідини, повертаючи перемикачі термометру опору, при настанні кипіння рідини та витримки її 1 хвилину – записати показання приладів у табл. 4.1.

6. Повторити описані вимірювання за подальших тисків та занести їх до табл. 4.1. Після досягнення атмосферного тиску (0 ат) та витримки у декілька хвилин для остаточного прогріву термометру температура кипіння буде максимальною і повинна бути близькою до 100°C .

7. По закінченні вимірювань вимкнути нагрівач, зняти ковпак, протерти його зсередини, а також вакуумну тарілку насухо і залишити їх у розібраному вигляді для сушіння.

8. Під час визначення величини температури за показаннями термометру опору провести розрахунки за формулою зміни опору з температурою $R = R_0 + \alpha t$, провести розрахунки зміни опору $R - R_0$ та визначити температури кипіння t [$t = (R - R_0)/\alpha$], які округлювати до $0,5 \dots 1^\circ\text{C}$ і також занести у табл. 4.1.

9. Побудувати графік залежності $t_{кип}(p)$ за даними табл. 4.1.

10. Обчислити значення $\ln p$ та $1000/T_{кип} = 1000/(t_{кип}+273)$ з точністю не менше *трьох значущих цифр* і також записати їх у таблицю.

11. Вибрати оптимальні значення на осях та побудувати другий графік $\ln p$ від $(1000/T)$, провести по середніх точках пряму (максимальна похибка для малих тисків p). За двома вибраними (максимально усуненими) точками на цій прямій визначити її нахил (його тангенс), який дорівнює $\Delta(\ln p)/\Delta(1/T) = -r/R$.

12. Обчислити за знайденим нахилом значення питомої теплоти пароутворення r , використовуючи відомі значення R_μ та μ для води. Порівняти результат з табличним значенням: $r = 2,26 \cdot 10^6$ Дж/кг за 100°C .

Врахувати, що при зменшенні температури до 0 °С величина теплоти пароутворення r дещо зростає (до 2,50 МДж/кг).

13. Оформити звіт і підготуватися до співбесіди за результатами роботи.

Таблиця 4.1

Результати вимірювань та їхнього обчислення

$p_{\text{вак}}$, ат	-1,0	-0,95	-0,9	-0,85	-0,8	-0,7	-0,6	-0,5	-0,4	-0,3	-0,2	0
p , бар												
R , Ом												
$R-R_0$, Ом												
t , °С												
$\ln p$, бар												
$1000/T$, К ⁻¹												

Атмосферний тиск $p_{\text{ат}} =$ мм рт. ст., $p_{\text{атм}} =$ бар.

$R = R_0 + \alpha t$ (Ом), де $R_0 = 1009$ Ом, $\alpha = 3.7$ Ом/К

Нахил графіка: $\Delta(\ln p)/\Delta(1/T) = -r/R =$ Па·К

Значення теплоти пароутворення: $r =$ МДж/кг

Контрольні запитання

1. Що таке пароутворення, його види.
2. Що таке кипіння? Які ознаки кипіння?
3. Зв'язок тиску насиченої пари при кипінні з зовнішнім тиском. Чому виникає кипіння?
4. Необхідні й достатні умови для процесу кипіння.
5. Що відбуватиметься з бульбашкою пари, яка піднімається через перегріту рідину, через недогріту рідину ($t_p < t_{\text{кип}}$)?
6. Чи зміниться і як температура кипіння високо у горах, у шахті?
7. Де використовується у технології харчування залежність температури кипіння рідини від тиску?
8. Які фази розділяє лінія кипіння, куди вона спрямовує за дуже малих і дуже великих тисків?
9. Проаналізуйте та порівняйте вашу експериментальну величину теплоти пароутворення r з табличними даними.
10. Чи використовується у холодильних машинах залежність температури кипіння рідини-хладагенту від тиску?

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНОГО ЦИКЛУ ПАРОКОМПРЕСОРНОЇ ХОЛОДИЛЬНОЇ МАШИНИ

Теоретичний вступ

Устаткування, за допомогою якого створюється охолодження тіл нижче температури навколишнього середовища і безперервне підтримання заданої низької температури називають *холодильними установками*. робоче тіло, що сприймає теплоту від тіл, що охолоджуються, і передає її навколишньому середовищу, зветься холодильним агентом або хладагентом.

Перенесення теплоти від тіла, що охолоджується до більш нагрітого тіла не може бути довільним процесом і, згідно з другим законом термодинаміки, повинен супроводжуватися витратою певної зовнішньої енергії або роботи.

Відведення теплоти від тіл, що охолоджуються ґрунтується на здійсненні хладагентом зворотного термодинамічного циклу, у якому робота стиску перевищує роботу розширення. Тому холодильна установка звичайно містить устаткування для стискання хладагента - компресор. Зниження температури хладагента (температури насичення) відбувається внаслідок зменшення тиску (див. лабораторну роботу ТД- 4) та здійснюється при його дроселюванні (проходженні хладагента хладагента через малий отвір - великий гідравлічний опір).

Згідно з першим законом термодинаміки (для 1 кг хладагента):

$$q_1 = l + q_2, \quad (5.1)$$

де: q_1 - кількість теплоти, що відведена у навколишнє середовище, l - робота, що виконується у зворотному циклі, q_2 - кількість теплоти, що відбирається від тіла, яке охолоджується.

Основним показником ефективності холодильного циклу є *холодильний коефіцієнт*, що визначається як відношення теоретичного значення (без урахування втрат) кількості теплоти q_2 , яка відведена у циклі від тіла, що охолоджується, до теоретичного значення витраченої роботи l :

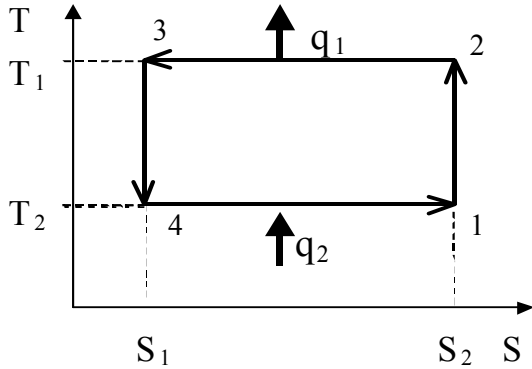
$$\varepsilon = q_2 / l = q_2 / (q_1 - q_2) \quad (5.2)$$

Найбільш економічним теоретичним циклом холодильних установок є зворотний цикл Карно, схематично наведений на рис. 5.1. При ізотермічному розширенні хладагент відбирає від тіла, що охолоджується кількість теплоти $q_2 = T_2 (s_2 - s_1)$, а при ізотермічному стисканні - віддає навколишньому середовищу кількість теплоти

$$q_1 = T_1 (s_4 - s_3) = T_1 (s_2 - s_1).$$

Вираз для холодильного коефіцієнта зворотного циклу Карно з урахуванням формули (5.2) має вигляд

$$\varepsilon_k = T_2 / (T_1 - T_2) \quad (5.3)$$



З цього виразу випливає, що економічність циклу Карно підвищується при зменшенні різниці температур навколишнього середовища та тіла, що охолоджується, оскільки при цьому зменшується величина витраченої роботи l при сталій величині кількості теплоти q_2 , що відведена від цього тіла.

Рисунок 5.1 Зворотний цикл Карно

Кількість теплоти Q_2 , яка відведена у холодильній установці від тіла, що охолоджується за одиницю часу, зветься *холододатністю* установки ($Q_2 = \varepsilon N \eta$, де N – потужність компресора, η – його механічний ККД). Кількість теплоти q_2 , що відведена від 1 кг хладагента, є питомою холодовидатністю.

У парокомпресорній установці в якості хладагента використовується волога пара рідини, температура насичення якої за атмосферного тиску нижча за 0°C ($-20 \dots -40^\circ\text{C}$) та яка сильно залежить від робочого тиску (див. лаб. роботу ТД-4). У цьому випадку хладагент використовується у двох фазових станах - газоподібному і рідкому, що дозволяє здійснити на практиці робочий цикл, близький до зворотного циклу Карно і отримати ефективну та компактну холодильну установку.

Принципову схему парокомпресорної установки подано на рис. 6.2, а її ідеальний цикл на Ts діаграмі - на рис. 5.3.

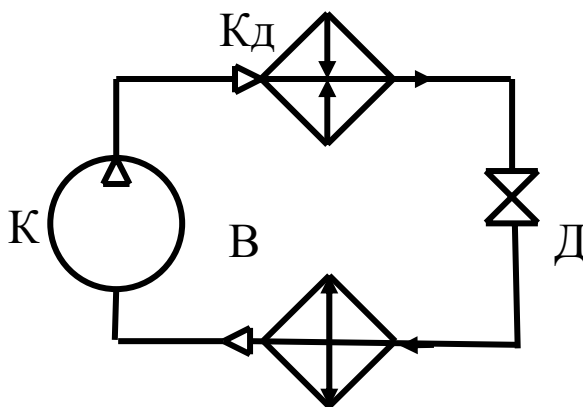


Рисунок 5.2

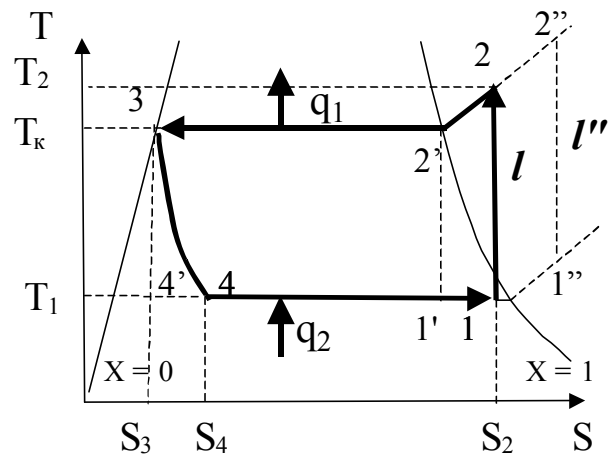


Рисунок 5.3

Компресор К (рис. 5.2) адіабатно стискає пару хладагента (виконує роботу l) і температура та внутрішня енергія пари підвищуються. Далі пара надходить у охолоджувач - конденсатор Кд, у якому вона конденсується внаслідок відведення теплоти q_1 до навколишнього середовища. Після цього рідкий хладагент спрямовується у детандер або дросельний вентиль Д, де внаслідок дроселювання тиск і температура насичення знижуються (див. лабораторну роботу ТД-4) і далі - у випарник В. У випарнику, що знаходиться у холодильній камері, "холодний" хладагент випаровується, забираючи теплоту q_2 від тіла, що охолоджується.

Теоретичний цикл парокомпресорної холодильної установки може відповідати циклу Карно - цикл $1' - 2' - 3 - 4' - 1'$ (рис. 5.3). Однак в області вологої пари робота компресора (процес $1' - 2'$) і детандера (процес $3 - 4'$) є технічно складною, при цьому також спостерігаються великі необоротні втрати. Тому реально компресори працюють із сухою парою - лінія $1 - 2$ (або $1'' - 2''$ - для перегрітої).

Для спрощення конструкції та підвищення її надійності у холодильників малої та середньої потужності замість детандера звичайно застосовується дросельний вентиль. Цикл такої установки описується контуром $1 - 2 - 2' - 3 - 4 - 1$. Як видно з рис. 5.3, кількість теплоти q_2 , що відбирається від об'єкту при охолодженні, зображується площею $S_1 - 1 - 4 - S_4 - S_1$, а кількість теплоти q_1 , що віддається у навколишнє середовище - площею $2 - 2' - 3 - S_3 - S_1 - 2$. У циклі парокомпресорної холодильної установки робота, що витрачена на стискання пари у компресорі, визначається через величини *питомої ентальпії* пари до і після компресора:

$$l = h_2 - h_1 \quad (5.4)$$

Кількості теплоти, що відведені хладагентом від об'єкта охолодження у навколишнє середовище, дорівнюють

$$q_1 = h_2 - h_3$$

$$q_2 = h_1 - h_3 = h_1 - h_4 \quad (5.5)$$

де $h_3 = h_4$ ($h = \text{const}$ - умова дроселювання). Відзначимо, що величину теплоти q_2 також можна розрахувати за формулою ізотермічного процесу $q_2 = T_2 (s_1 - s_4)$ за даними діаграми.

Звідси, з урахуванням формули (5.2), отримаємо наступний вираз для холодильного коефіцієнта парокомпресорного циклу:

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_4}{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)} \approx \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (5.6)$$

Експериментальна установка

Лабораторна установка (рис. 5.4) відповідає спрощеній схемі парокомпресорної холодильної машини і складається з наступних вузлів: К - компресор, Кд - конденсатор, Д - дросельний вентиль, В - випарник, що знаходиться у холодильній камері ХК та ресивера Р, у якому зберігається фреон.

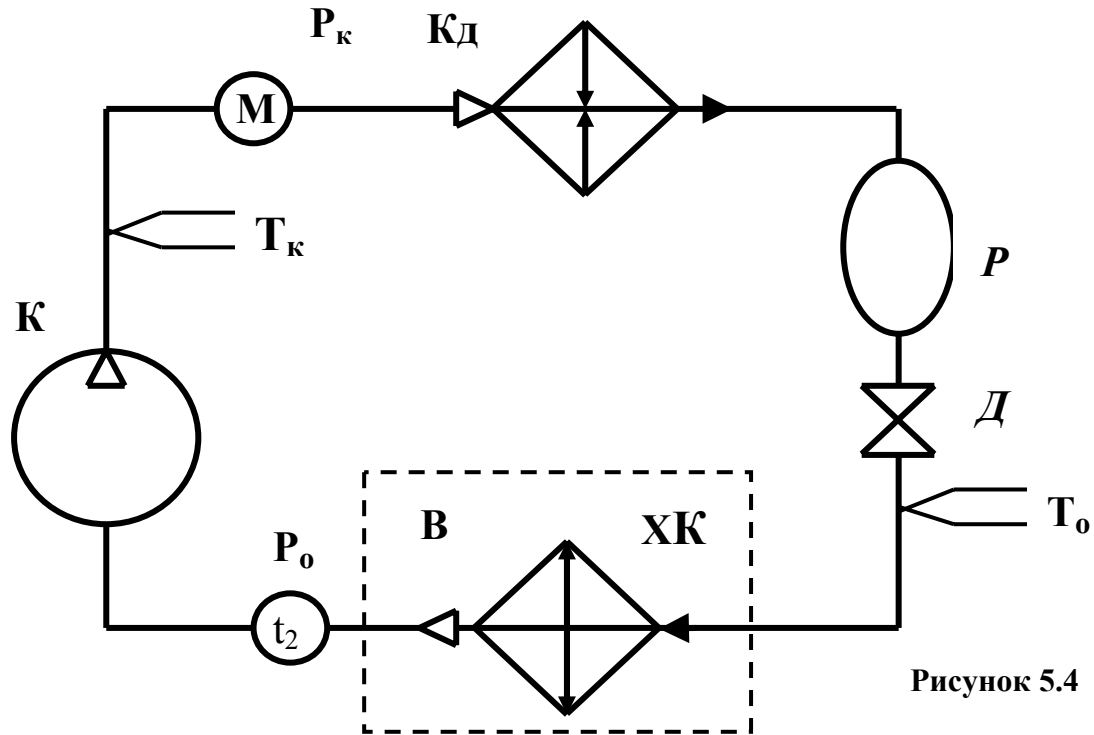


Рисунок 5.4

У схему холодильної установки вмонтовані наступні вимірювальні прилади:

- манометри p_o і p_k для вимірювання тиску кипіння хладагенту у випарнику та конденсації у конденсаторі, відповідно;
- термометри T_o і T_k для вимірювання температур пари хладагенту до і після компресора.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з обладнанням лабораторної установки і вимірювальними приладами.
2. Після отримання допуску, з дозволу викладача включити установку за допомогою вимикача “Вкл”.
3. Через 5 хвилин зняти показання вимірювальних приладів і записати їх у таблицю вимірювань ($p_{ош}$, $p_{кш}$ - надлишкові тиски у випарнику і у конденсаторі у барах, показання термометрів T_o і T_k : E_1 і E_2 у mV). Продовжити знімати показання через кожні 5 хвилин.
4. Після настання стаціонарного режиму закінчити вимірювання і вимкнути установку. Стаціонарний режим визначається у момент, коли

значення ЕРС термопар не відрізняються від попередніх, або відрізняються не більш ніж на $\pm 0,05$ мВ (тобто на ± 1 К) насамперед - для температури T_o у випарнику.

5. За даними останнього вимірювання (для стаціонарного режиму) визначити абсолютні тиски p_o і p_k [в ата] ($p = p_{над} + p_{атм}$, вважати $p_{атм} = 1,0$ ат) і температури T_o і T_k у $^{\circ}\text{C}$ (температури T_4 та T_2 - на діаграмі, відповідно) за таблицею градування термопар (див. додатки 1 - 3). Користуючись Ts - діаграмою для хладагента (фреон-12), побудувати робочий цикл холодильної установки (аналогічно рис. 5.3). Визначити температури $T_{кин}$ і $T_{конд}$ (T_1, T_3) у випарнику та у конденсаторі, занести їх до таблиці вимірювань (дивись вказівку щодо побудови Ts - діаграми циклу холодильної установки нижче).

Таблиця 5.1

Таблиця вимірювань

Час, хв.	P_o , ат	P_k , ат	E_o , mV	E_k , mV
5				
10				
15				
20				
25				
30				

Таблиця 5.2

Значення параметрів у робочому режимі

	P , ата	t , $^{\circ}\text{C}$	h , Дж/кг	s , Дж/(кг К)
Точка 1				
Точка 2				
Точка 3				
Точка 4				

6. Визначити за Ts - діаграмою фреону значення ентропії та ентальпії його у крайніх точках діаграми та занести їх до табл.5.2.

7. Розрахувати величину холодильного коефіцієнта за формулою (5.6) для побудованого циклу.

8. Оформити звіт за лабораторною роботою і підготуватися до співбесіди за її результатами.

Вказівка: Побудову робочої діаграми (як на рис. 5.3) розпочати з точки 3. На Ts - діаграмі фреону є додатковий графік залежності температури його насичення від абсолютного тиску (додаткова шкала тиску по горизонталі знизу). Він дозволяє визначити температуру кипіння фреону $t_{кип}$ залежно від тиску p_3 у точці 3 (табл. 5.2). Вправо від неї будуюмо ізобару $2' - 2$ до температури T_2 (точка 2) та вліво ізотерму - ізобару ($3 - 2'$) до перетину з лінією кипіння (точка 3), а вниз від точки 3 лінію дроселювання ($3 - 4$) паралельно лініям $h = const$ діаграми. Вертикально вниз від точки 2 будуюмо адіабату ($s = const$). Знизу обидві ці криві обмежені ізотермою - ізобарою ($4 - 1 - \dots(1'')$). Перетин цієї кривої з лінією дроселювання $h = const$ дає точку 4, а з лінією адіабати $s = const$ - точку 1 циклу.

Контрольні запитання

1. Що таке холодильна установка, намалюйте її найпростішу схему. Опишіть роботу основних елементів установки.
2. Напишіть перший закон термодинаміки для робочого циклу холодильної установки та поясніть його.
3. Чи порушується другий закон термодинаміки, коли охолоджується більш холодне тіло ?
4. Докладно і послідовно опишіть усі процеси циклу холодильної установки.
5. Як на Ts - діаграмі зображаються різні ізопроцеси ?
6. Зобразите Ts - діаграму циклу холодильної установки та докладно і послідовно опишіть усі процеси циклу.
7. Чому реальні холодильники не працюють за зворотним циклом Карно ?
8. Що характеризує холодильний коефіцієнт? Визначить його через ентальпію.
9. Чи свідчить те, що холодильний коефіцієнт $\varepsilon > 1$, про порушення закону збереження енергії ?

РОЗДІЛ II

ТЕПЛОПЕРЕДАЧА. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ ТА ТЕПЛОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ РЕЧОВИНИ

Теорія теплообміну (або *теплопередача*) вивчає процеси розповсюдження теплоти в твердих, рідких, та газоподібних тілах. Теплота передається трьома основними способами: теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням.

Теплопровідність - це процес розповсюдження теплоти між тілами, що безпосередньо стикаються, або між частками одного й того ж тіла, що мають різну температуру. Цей процес головним чином відбувається у твердих тілах. Основний закон теплопровідності - *закон Фур'є*.

Вектор густини теплового потоку пропорційний градієнту температури:

$$q = - \lambda \operatorname{grad} t,$$

де λ - *коефіцієнт теплопровідності* [Вт/(м К)], який характеризує здатність даного тіла (речовини) проводити теплоту. Визначенню коефіцієнта теплопровідності присвячено лабораторну роботу ТП-1.

Конвекція – це теплообмін, який відбувається під час переміщення (руху) нерівномірно нагрітих об'ємів теплоносія – рідини або газу. Конвекція буває *вільна* (довільний рух рідини або газу, найчастіше внаслідок дії сили Архімеда, що виникає під час нагріву або охолодження рідини або газу) та *вимушена* (рух під дією зовнішніх сил).

Інтенсивність конвекції суттєво залежить від *режиму течії теплоносія* (ламінарний, перехідний або турбулентний режими).

Теплообмін між твердою *стілкою* та *рідиною* або газом називають **тепловіддачею**. Основний закон тепловіддачі - *закон Ньютона-Рихмана*.

Тепловий потік у процесі тепловіддачі пропорційний площі поверхні теплообміну F та різниці температур поверхні t_c та рідини (газу) t_p :

$$Q = \alpha F (t_c - t_p),$$

де α - *коефіцієнт тепловіддачі* [Вт/(м² К)], який залежить від багатьох параметрів - теплофізичних властивостей теплоносія (його теплопровідності, в'язкості, густини та ін.), геометрії поверхні теплообміну, швидкості течії та ін. У лабораторних роботах ТП-2, та ТП-3 цей коефіцієнт визначається експериментально та теоретично – за допомогою критеріїв подібності.

Теорія подібності – наука про подібні фізичні явища. В ній розмірні фізичні величини об'єднуються в безрозмірні комплекси – *числа подібності* або *критерії* фізичної подібності: Nu , Pr , Re , Gr , Ge , Ku та ін. Фізичний сенс чисел подібності: це (найчастіше) відношення тих сил, що спонукають процес до тих, що його гальмують. Критерії мають одне значення, тому що визначаються за певними правилами (звичайно це: l_o – визначальний розмір, що впливає на конвекцію, t_o – визначальна температура, за якою визначають властивості ТН з таблиць).

Критеріальні рівняння відображають зв'язок між критеріями подібності у різних видах конвекції з урахуванням режимів течії рідини або газу. Режими течії рідини також визнаються з критичних значень деяких критеріїв (з Re – Рейнольдса для вимушеної конвекції, з $Gr \cdot Pr = Ra$ – числа Релея – для вільної).

$$\text{а) вільна конвекція} \quad Nu = C (Gr Pr)^n = C Ra^n,$$

де $l_o = d$ – горизонтальна труба, $l_o = l = H$ – вертикальна, $t_o = t_m = t_{cp} = (t_c - t_p)/2$, $\beta_{газ} = 1/T_m$, коефіцієнти C , n – таблиця за значеннями $Gr \cdot Pr = Ra$ – числа Релея, що визначає також режими течії – див. додаток 6.

$$\text{б) вимушена конвекція в трубах} \quad Nu = C Re^m Pr^{0.43} (Pr/Pr_c)^{0.25},$$

де $l_o = d$, $t_o = t_p$, у ламінарному режимі $C=0,15$, $n=1/3$, у турбулентному – $C=0,021$, $n=0,8$, режими течії визначаються за числом Рейнольдса Re .

$$\text{в) конденсація} \quad Nu = C (Ku Ga Pr)^{0.25} (Pr/Pr_c)^{0.25}$$

де за ламінарного режиму течії $C_2 = 0,728$ і $l_o = d$ для горизонтальної труби, $C_2 = 0,943$, $l_o = l = H$ для вертикальної стінки чи труби. У випадку перехідного режиму течії конденсату для вертикальної стінки $C_{2вн} = 1,14$, $t_o = t_{конд} = (t_n + t_c)/2$.

Теплове випромінювання - складний процес, який полягає у перетворюванні внутрішньої енергії тіла (енергії коливань зарядів ядер та електронів) на енергію електромагнітних хвиль, розповсюдження цих хвиль у просторі та поглинання енергії цих електромагнітних хвиль іншими тілами.

Тепловий потік, який випромінюється з одиниці поверхні тіла за всіх довжин хвиль, є *поверхнева густина потоку інтегрального випромінювання* E . Вона вимірюється у $\text{Вт}/\text{м}^2$ і залежить від стану поверхні тіла і його температури.

Частина енергії випромінювання $E_{над}$, що падає на тіло, поглинається (E_A), частина відбивається (E_R) і частина проникає крізь нього (E_D). Таким чином, $E_A + E_R + E_D = E_{над}$, або $A + R + D = 1$ – рівняння енергетичного балансу, де $A = E_A/E_{над}$ - коефіцієнт поглинання, R – коеф-т відбиття, D – коеф-т пропускання.

Тіло, яке поглинає все випромінювання, що падає на нього, зветься *абсолютно чорним тілом* – АЧТ. Для нього $A = 1$ і $R = D = 0$. Тіло, яке відбиває все випромінювання, що падає на нього, зветься *абсолютно білим* ($R = 1, A = D = 0$). Тіло, яке пропускає все випромінювання, що падає на нього, називається *абсолютно прозорим* ($D = 1, A = R = 0$). Абсолютно чорних, білих і прозорих тіл у природі не існує, тому реальні тіла мають назву “сірих”.

Закономірності теплового випромінювання визначаються законами Планка, Стефана-Больцмана, Кірхгофа та ін.

Закон *Планка* встановлює залежність поверхневої густини потоку монохроматичного випромінювання АЧТ від довжини хвилі та температури:

$$E_{0\lambda} = \frac{c_1}{\lambda^5} (e^{c_2/\lambda T} - 1)^{-1},$$

де $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-16}$ Вт м²; $c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ м К - сталі випромінювання; λ - довжина хвилі випромінювання, м; T - температура тіла, яке випромінює, К.

З рисунку II видно, що чим вища температура, тим більше величина $E_{0\lambda}$. Максимуми кривих λ_m з підвищенням температури зміщуються у бік більш коротких довжин хвиль.

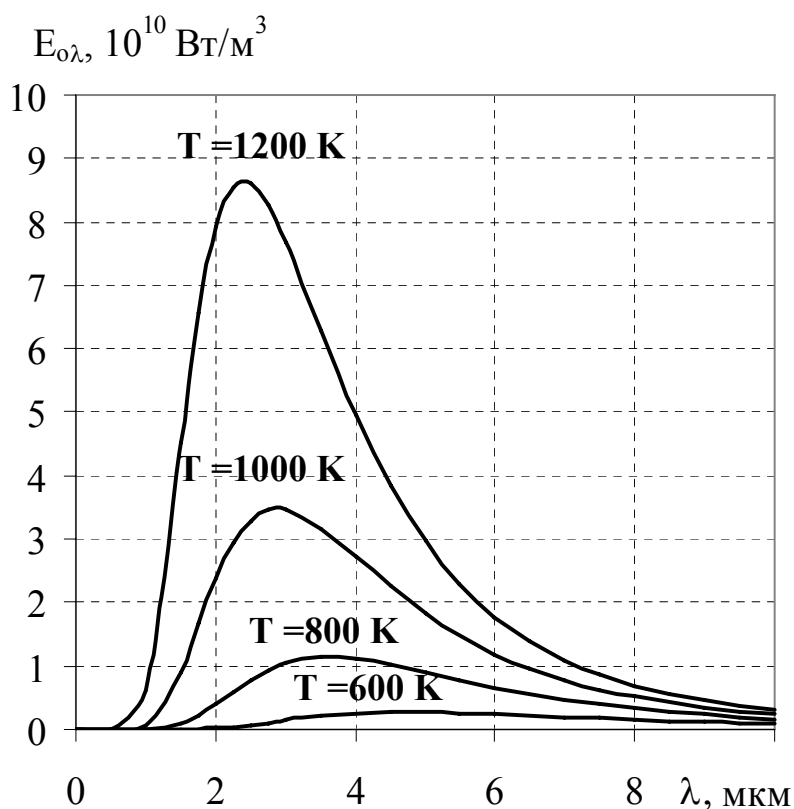


Рисунок II – Залежність монохроматичної (спектральної) густини потоку випромінювання абсолютно чорного тіла $E_{0\lambda}$ від довжини хвилі та температури за законом Планка.

За законом *зміщення Віна* довжина хвилі λ_m у максимумі енергії спектру випромінювання обернено пропорційна величині абсолютної температури тіла T :

$$\lambda_m = \frac{b}{T} = \frac{2.8978 \cdot 10^{-3}}{T}, (\text{м}) \quad \text{або} \quad \lambda_m = \frac{2898}{T} (\text{мкм}),$$

де $b = 2,8978 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$ - стала Віна.

Згідно із законом *Кірхгофа* відношення випромінювальної і поглинальної здатності при тепловій рівновазі не залежить від природи тіла і дорівнює енергії випромінювання абсолютно чорного тіла за тій самій температури:

$$\frac{E}{A} = E_o = \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Оскільки $E = \varepsilon E_o$ і $E = A E_o$, то маємо: $A = \varepsilon$, що виконується завжди для будь-якої поверхні або її частини.

Згідно основного закону теплового випромінювання **Стефана-Больцмана** кількість енергії, що випромінюється з 1 м^2 поверхні абсолютно чорного тіла для всіх довжин хвиль, визначається як

$$E_o = \int_0^{\infty} E_{o\lambda} d\lambda = \sigma_o T^4 \quad \text{або} \quad E = \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4,$$

де E_o - енергія, що випромінюється з 1 м^2 поверхні АЧТ, Вт/м²;

ε – ступінь чорноти поверхні тіла;

T - абсолютна температура поверхні тіла, К;

$\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - стала Стефана-Больцмана;

$C_o = \sigma_o \cdot 10^8 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коефіцієнт випромінювання АЧТ.

Для двох тіл з температурами T_1 та T_2 теплообмін випромінюванням:

$$Q = C_o \varepsilon_{3\text{в}} \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F_1, \quad \text{де} \quad \varepsilon_{3\text{в}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{F_1}{F_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right)}$$

— *зведена ступінь чорноти* системи тіл 1 та 2 з площами поверхонь F_1 та F_2 .

Згідно із законом *Кірхгофа* відношення випромінювальної і поглинальної здатності при тепловій рівновазі не залежить від природи тіла і дорівнює енергії випромінювання абсолютно чорного тіла за тій самій температури:

$$\frac{E}{A} = E_o = \varepsilon \cdot C_o \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Оскільки $E = \varepsilon E_0$ і $E = A E_0$, то завжди маємо: $A = \varepsilon$.

Визначення ступеня чорноти, та поверхневої густини потоку інтегрального випромінювання проводиться у лабораторній роботі ТП-4.

Часто виникає необхідність розрахування **теплопередачі** теплового потоку від одного теплоносія до іншого через тверду стінку. Основне рівняння теплопередачі має вигляд

$$q = k (t_{p1} - t_{p2}),$$

де t_{p1} , t_{p2} - температури теплоносіїв (рідин),

k - коефіцієнт теплопередачі.

Обернена до коефіцієнту теплопередачі величина $R_{\text{сум}} = 1/k$ зветься сумарним термічним опором теплопередачі та складається з внутрішнього термічного опору стінки $R_t = \delta/\lambda$ та з зовнішнього термічного опору тепловіддачі стінки $R_t = 1/\alpha$.

Для плоскої багатошарової стінки з n шарів маємо

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

Для циліндричної багатошарової стінки

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\pi \alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi \lambda_i} \cdot \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\pi \cdot \alpha_2 \cdot d_{n+1}}},$$

де α_1 , α_2 - коефіцієнти тепловіддачі теплоносіїв;

δ_i - товщини шарів стінки;

λ_i - коефіцієнти теплопровідності шарів стінки;

d_1 , d_{n+1} - внутрішній та зовнішній діаметри циліндричної стінки.

Стаціонарність теплового процесу

Тепловий потік Q , що підводиться до системи, розподіляється на її нагрівання Q_n , на тепловтрати з поверхні – теплопровідністю Q_m , конвекцією Q_k та випромінюванням Q_v :

$$Q = Q_n + Q_m + Q_k + Q_v.$$

Ці складові можна описати через відповідні фізичні закони:

$$Q = C_n (\Delta t / \Delta \tau)_{сер} + \lambda F grad t + \alpha (t_p - t_c) F + \varepsilon_{зв} C_o \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F.$$

З найменшою точністю нам відомо про теплоту, що йде на нагрівання, бо невідоме значення теплоємності системи C_n і її частин та значення середньої швидкості нагрівання або охолодження системи за час $\Delta \tau$:

$$(\Delta t / \Delta \tau)_{сер} = \int \frac{dt}{d\tau} d\tau / \Delta \tau, \text{ яка до того ж може дуже сильно змінюється в різних}$$

точках об'єму системи. Щоб не враховувати невідомі значення параметрів нагрівання або охолодження, виміри здійснюються за *стаціонарного режиму*, коли всі температури не змінюються, тобто: $t(\tau) = const$. У наслідок цього $\frac{dt}{d\tau} = 0$, і розрахунок потоку Q значно спрощується. Тоді $Q_n = 0$ та при $Q_m \approx 0$, що виконується для більшої частини випадків розрахунку, маємо значно простіше співвідношення для розрахунків:

$$Q = Q_k + Q_\varepsilon = \alpha (t_p - t_c) F + \varepsilon_{зв} C_o \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] F.$$

Тому під час вимірів теплових параметрів системи ($T, \alpha, \lambda, \varepsilon$) у лабораторних роботах цього циклу треба дочекатися виходу системи на стаціонарний режим. Для цього треба щоб за 5 хвилин температура системи змінилась не більш, ніж на 1 °С, що в одиницях термо-ЕРС термопар складає приблизно 0,04...0,06 мВ. Тому за умову виходу системи на стаціонарний режим будемо вважати той випадок, коли за 5 хвилин середня температура системи змінилась не більш ніж на півподілки мілівольтметра (< 0,05 мВ). Тому ЕРС термопар треба вимірювати з точністю, не гіршою за чверть поділки мілівольтметра.

Невиконання цієї умови призводить до великих похибок у визначенні значень теплових параметрів системи під час розрахунку результатів роботи.

ВИМІРЮВАННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ ТВЕРДИХ ТІЛ МЕТОДОМ ПЛОСКОГО ШАРУ

Теоретичний вступ

Теплопровідність - один з видів переносу теплоти від більш нагрітих тіл до менш нагрітих, що призводить до вирівнювання температури. Перенесення теплоти механізмом теплопровідності здійснюється в нерівномірно нагрітих твердих, рідких та газоподібних тілах шляхом безпосереднього обміну енергією теплового руху між найменшими частинками речовини - молекулами, атомами, електронами. У газоподібних тілах розповсюдження теплоти теплопровідністю відбувається внаслідок обміну енергією при зіткненні молекул, що мають різну швидкість теплового руху. У металах такими структурними частинками є вільні електрони, у рідинах і твердих тілах (діелектриках) теплота переноситься шляхом безпосередньої передачі теплового руху молекул і атомів сусіднім частинкам речовини у формі пружних хвиль.

Згідно з *основним законом теплопровідності* - законом Фур'є, вектор густини теплового потоку, що передається теплопровідністю, пропорційний градієнту температури:

$$q = - \lambda \operatorname{grad} t, \quad (1.1)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності речовини, що характеризує здатність даної речовини проводити теплоту. Кількісно коефіцієнт теплопровідності дорівнює густині *теплового потоку* (тобто кількості теплоти, що проходить за одиницю часу через одиницю ізотермічної поверхні) при умові, що градієнт температури ($\operatorname{grad} t = \partial/\partial n$) дорівнює 1 К/м. Вимірюється він у Вт/(м К).

Коефіцієнт теплопровідності залежить від природи речовини, її структури, температури та інших чинників. Найгіршими провідниками теплоти є гази. Коефіцієнт теплопровідності газів зростає зі збільшенням температури і складає 0,005...0,5 Вт/(м К). Для рідин $\lambda = 0,07...0,7$ Вт/(м К) і, як правило, зменшується зі збільшенням температури. Найкращими провідниками теплоти є метали, у яких $\lambda=10...420$ Вт/(м К). Зі збільшенням температури теплопровідність більшості металів зменшується. Неметалічні матеріали мають значно меншу теплопровідність $\lambda= 0,02...5$ Вт/(м К). Матеріали з $\lambda < 0,25$ Вт/(м К), які застосовуються для теплової ізоляції, звуться *теплоізоляційними*. Із природних теплоізоляторів широко застосовуються азбест, слюда, дерево, пробка, тирса та інші, із штучних - мінеральна вата, скляна вата, пінопласт та інші. Зі зростанням температури їх теплопровідність збільшується, тому що вона пов'язана з теплопровідністю газів.

Розглянемо однорідну плоску стінку товщиною δ (рис. 1.1). На зовнішніх поверхнях стінки підтримуються постійні температури t_{c1} та t_{c2} . Температура змінюється тільки по товщині пластини - по одній координаті x . Враховуючи, що для такого одномірного випадку $grad\ t = \partial t / \partial x$ та використовуючи основний закон теплопровідності (1.1), отримаємо диференціальне рівняння стаціонарної теплопровідності для плоскої стінки :

$$q = - \lambda grad\ t = - \lambda \partial t / \partial x \quad (1.2)$$

У стаціонарних умовах, коли енергія не витрачається на нагрівання, густина теплового потоку q незмінна по товщині стінки. При $\lambda = const$:

$$dt/dx = - q / \lambda = const,$$

тобто залежність температури t від координати x лінійна (рис. 1.1). Поділивши змінні у рівнянні (1.2) та проінтегрувавши по t від t_{c1} до t_{c2} і по x від 0 до δ

$$\int_{t_{c1}}^{t_{c2}} dt = - \frac{q}{\lambda} \int_0^{\delta} dx,$$

одержимо
$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) \quad (1.3)$$

або
$$Q = qF = \frac{\lambda F}{\delta} (t_{c1} - t_{c2}) \quad (1.4)$$

Одержана формула (1.4) широко розповсюджена у теплових розрахунках. За її допомогою можна розрахувати коефіцієнт теплопровідності матеріалу, якщо експериментально заміряти тепловий потік та різницю температур на поверхнях пластин відомих розмірів, де F - площа поверхні стінки.

Формулу (1.4) можна записати у вигляді

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R_t} = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta / \lambda},$$

де $R_t = \delta / \lambda$ - термічний опір плоскої стінки.

Порівнюючи формули (1.1)...(1.3) визначимо для градієнта температури плоскої стінки за стаціонарного режиму

$$grad\ t = \frac{dt}{dx} = \frac{t_{c2} - t_{c1}}{\delta} \quad (1.5).$$

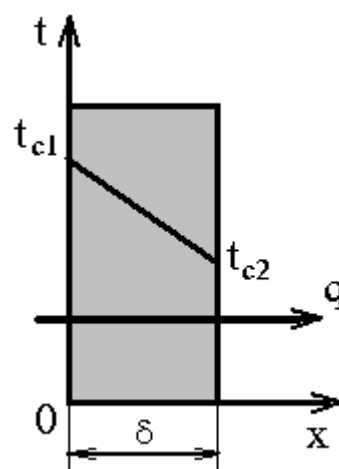


Рисунок 1.1. Однорідна плоска стінка

Для циліндричної стінки $Q = \frac{\pi(t_{c1} - t_{c2})l}{R_l}$, де $R_l = \frac{1}{2\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}$ -

термічний опір циліндричної стінки, l - довжина, d_1, d_2 - внутрішній і зовнішній діаметри.

Мета даної лабораторної роботи полягає в експериментальному визначенні коефіцієнта теплопровідності теплоізоляційного матеріалу.

Експериментальна установка

Схему експериментальної установки подано на рис. 1.2

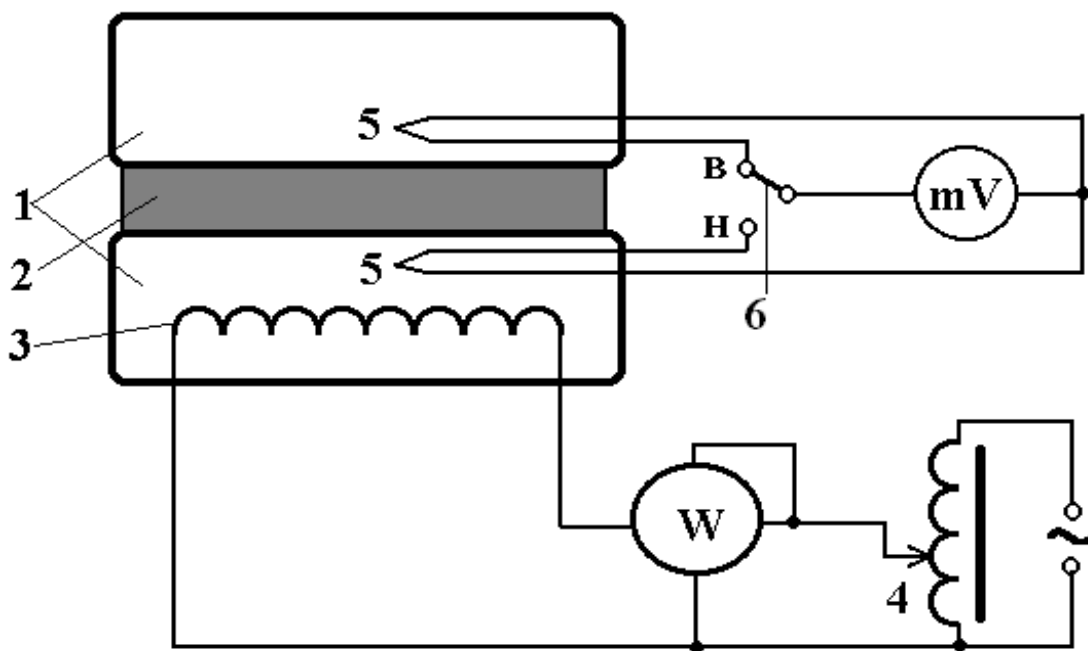


Рисунок 1.2. Схема експериментальної установки

Поміж масивними алюмінієвими дисками 1 розміщено зразок матеріалу, що досліджується 2. У нижній диск вмонтований нагрівач 3. Нагрівач живиться від автотрансформатора 4, увімкнутого в електричну мережу 220 В. Потужність нагрівача $P = U I$ показує ватметр W. Температури дисків вимірюються термопарами 5, що за допомогою перемикача 6 по чергово підключаються до мілівольтметра mV. За показаннями мілівольтметра за допомогою таблиці градуювання термопар, що розміщується на лабораторному стенді, можна визначити температури нижнього та верхнього дисків t_n і t_e (причому $t_n > t_e$).

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з обладнанням лабораторної установки. Перевірити правильність електричних з'єднань в установці. Визначити ціну поділки шкал вимірювальних приладів.

2. Заміряти товщину шару матеріалу, що досліджується, та розмістити його поміж дисками установки.

3. Після одержання допуску до роботи та з дозволу викладача включити живлення автотрансформатора. Встановити автотрансформатором по ватметру потужність 90 Вт.

4. Спостерігати за показаннями мілівольтметра приблизно протягом однієї години при положеннях перемикача термопар 6 "В" та "Н" і встановити момент настання стаціонарного режиму. Для цього кожні 5 хв. слід заносити до таблиці 1.1 показання мілівольтметра mV : E_n (перемикач у положенні "Н"), E_6 (перемикач у положенні "В") та розраховувати величину $\Delta E = E_n - E_6$. При настанні квазістаціонарного режиму величина ΔE не змінюється протягом трьох-чотирьох вимірювань. Побудувати графіки змінення ЕРС від часу.

Таблиця 1.1

Таблиця вимірювань

τ , хв.	5	10	15	20	25	30	35	40	...
E_n , mV									
E_6 , mV									
ΔE , mV									

5. Записати останні показання мілівольтметра E_n та E_6 при настанні квазістаціонарного режиму у таблицю 1.2.

6. Підвищити потужність нагрівача за допомогою автотрансформатора і встановити за ватметром значення потужності 150 Вт. Повторити дії згідно з п.п. 4 та 5.

7. Записати температуру навколишнього повітря у кімнаті t_k за лабораторним термометром. За допомогою таблиці для градування термопар визначити відповідне значення термо-ЕРС E_k у mV. Додати значення E_k до значень $E_{но}$ та E_{60} за стаціонарного режиму та у яких враховано опори термопар та вимірювального приладу (див. Додаток 3). Для одержаних значень $E_{но} + E_k$ та $E_{60} + E_k$ за таблицею для градування термопар визначити температури t_n та t_6 .

8. За формулою (1.5) розрахувати відповідні значення градієнтів температури для кожного з режимів.

9. У роботі вихід системи на стаціонарний режим дуже довгий. Тому вимірювання здійснимо у квазістаціонарному режимі, коли обидва алюмінієві диски гріються з однаковою швидкістю, тобто $t_n - t_6 = const$ ($\Delta E = E_n - E_6 = const$). Тоді, вважаючи що теплоємності верхнього та нижнього дисків однакові, та нехтуючи теплоємністю зразка та тепловтратами, можна записати, що через зразок передається половина теплового потоку від нагрівача P :

$$Q = \frac{P}{2} = \frac{\lambda}{\delta} F (t_n - t_e). \quad (1.6)$$

Звідси виходить розрахункова формула для визначення коефіцієнта теплопровідності зразка λ :

$$\lambda = \frac{P \cdot \delta}{2 \cdot F \cdot (t_n - t_e)}, \quad (1.7)$$

де F - площа стінки зразка, $F = 0,037 \text{ м}^2$;

δ - товщина стінки, що за необхідністю вимірюється штангенциркулем;

P - потужність нагрівача - контролюється ватметром, що увімкнено у коло живлення нагрівача;

t_n та t_e - температури нижнього та верхнього дисків після настання стаціонарного режиму, що вимірюється термопарами, які вмонтовані у диски.

За формулою (1.7) розрахувати відповідні значення λ для кожного режиму.

10. За формулою $R_t = \delta/\lambda$ визначити термічний опір стінки.

11. Результати розрахунків занести у таблицю 1.2

Таблиця 1.2

Таблиця розрахунків

№ з/п.	P , Вт	E_n , мВ	E_e , мВ	$E_n + E_{к\gamma}$, мВ	$E_e + E_{к\gamma}$, мВ	t_n , °С	t_e , °С	t_{cp} , °С	$grad t$, К/м	λ , Вт/(м К)	R_t , м ² ·К/Вт
1.											
2.											

12. Вимкнути установку. Скласти звіт про виконану лабораторну роботу та підготуватися до співбесіди за її підсумками.

Контрольні запитання

1. Що означають поняття: тепловий потік, густина теплового потоку? У яких одиницях вони вимірюються?
2. Стаціонарний режим теплообміну, що це таке?
3. Що таке температурний градієнт, який його напрямок та у яких одиницях він виражається?
4. Що таке теплопровідність? Основний закон теплопровідності (закон Фур'є). Від чого залежить теплопровідність?
5. Вивести формули теплового потоку для плоскої та циліндричної стінок.

ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ ПІД ЧАС ВІЛЬНОЇ КОНВЕКЦІЇ ПОВІТРЯ

Теоретичний вступ

Конвекція - це передача теплоти шляхом руху та переміщення у просторі нерівномірно нагрітих об'ємів рідин чи газів під дією масових сил (вільна конвекція) або під дією сторонніх збудників - насоса, вентилятора (вимушена конвекція).

Конвекційний теплообмін між рідиною (або газом) та твердою стінкою зветься **тепловіддачею**. Згідно із законом **Ньютона-Ріхмана** тепловий струм у процесі тепловіддачі пропорційний площі поверхні теплообміну F та різниці температур поверхні стінки t_c і рідини (газу) t_p :

$$Q = \alpha F (t_c - t_p) . \quad (2.1)$$

Коефіцієнт пропорційності α зветься **коефіцієнтом тепловіддачі**; одиниця його виміру Вт/(м² К). Він характеризує інтенсивність процесу тепловіддачі. Чисельне значення його дорівнює тепловому потоку від одиничної поверхні теплообміну при різниці температур поверхні та рідини у 1 К.

Коефіцієнт тепловіддачі α визначають експериментально, вимірюючи тепловий потік Q та різницю температур $\Delta t = t_c - t_p$ у процесі тепловіддачі від поверхні відомої площі F :

$$\alpha_{експ} = \frac{Q_K}{F \cdot (t_c - t_p)} . \quad (2.2)$$

Величина α залежить від багатьох факторів - теплофізичних властивостей теплоносія (теплопровідності λ , в'язкості μ або $\nu = \mu / \rho$, густини ρ , коефіцієнта об'ємного розширення β , питомої теплоємності C_p), геометрії поверхні теплообміну (форми та розмірів), швидкості течії теплоносія w , температур теплоносія і поверхні t_p і t_c та інших.

Залежність α від великої кількості параметрів створює значні ускладнення при дослідженні конвективного теплообміну. Тут допомагає теорія подібності, що дозволяє на основі окремих досліджень або чисельних розрахунків одержати узагальнену залежність та дає можливість вивчення робочих процесів у теплотехнічних приладах, зокрема явища теплопередачі, на спеціальних "моделях", в яких ці процеси утворюються таким же чином, як і в "натуральному" приладі.

Згідно з основною теоремою подібності, фізичні явища подібні, якщо для них однакові безрозмірні комплекси - числа (критерії) подібності.

Для теорії тепловіддачі основними є наступні числа подібності:

- Рейнольдса $Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu}$,
- Прандтля $Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$,
- Нусельта $Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}$,
- Кутателадзе $Ku = \frac{r}{C_p \cdot \Delta t}$
- Грасгофа $Gr = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2} \beta \cdot \Delta t$,
- Галілея $Ga = \frac{g \cdot l^3}{\nu^2}$

де w - швидкість течії, м/с;

l - визначальний розмір (для горизонтально розташованого циліндра - діаметр, для вертикально розташованого - висота), м;

μ, ν - коефіцієнти динамічної та кінематичної в'язкості ($\mu = \nu \rho$);

ρ - густина теплоносія, кг/м³;

g - прискорення вільного падіння, м/с²;

α - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м² К);

λ - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м К);

β - коефіцієнт об'ємного розширення, К⁻¹ (для газів: $\beta = \frac{1}{T_{cp}} = \frac{1}{t_{cp} + 273}$);

C_p - питома теплоємність при сталому тиску, Дж/(кг К);

$\Delta t = t_c - t_p$ - температурний напір, К;

r - питома теплота випаровування, Дж/кг.

Усі значення теплофізичних параметрів, що входять до складу критеріїв подібності, визначаються при характерній (визначальній) температурі. Для вільної конвекції - це середня температура пристінного шару: $t_{cp} = 0,5 (t_c + t_p)$, для вимушеної конвекції - температура рухомого середовища t_p , для тепловіддачі при конденсації - температура насичення t_n .

Використовуючи подані вище критерії подібності, можна надати результати експериментальних досліджень тепловіддачі у вигляді критеріальних рівнянь.

Для вільної конвекції критеріальне рівняння (універсальне критеріальне рівняння Михеєва) має вигляд:

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^n = C Ra^n, \quad (2.3)$$

Значення коефіцієнта C та показника n визначаються залежно від величини розрахованого добутку критеріїв ($Gr Pr = Ra$ - число Релея) - табл. 2.1.

Таблиця 2.1

$Gr Pr = Ra$	C	n
$< 10^{-3}$	0,5	0
$10^{-3} \dots 500$	1,18	1/8
$500 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4
$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$	0,135	1/3

Метою лабораторної роботи є експериментальне визначення коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{експ}$, та теоретичний розрахунок коефіцієнта $\alpha_{теор}$, використовуючи критерії подібності.

Експериментальна установка

Принципову схему установки представлено на рисунку 2.1.

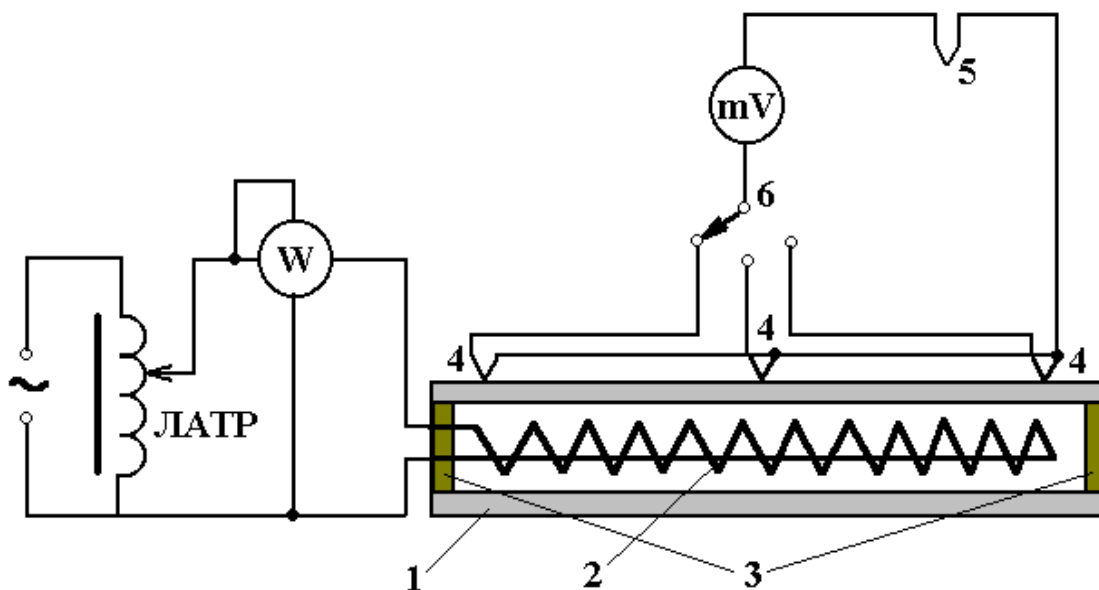


Рисунок 2.1. Схема експериментальної установки

Основним елементом установки є горизонтально розташована труба 1, довжина якої $l = 800$ мм, а діаметр $d = 40$ мм. В середині труби знаходиться нагрівач 2. Живлення нагрівача здійснюється від мережі однофазного змінного струму 220В через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР), який регулює величину потужності теплового потоку, що виділяється на спіралі нагрівача. Цю потужність показує ватметр W. Для запобігання втрат тепла, торці труби 3 теплоізолювані. Для виміру середньої температури поверхні теплообміну служать хромель-алюмеліві термопари 4, які прикріплені до труби 1, холодний спай термопар 5 закріплено на перемикачу термопар 6. ЕРС термопар вимірюється мілівольтметром mV.

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою. Перевірити правильність електричних з'єднань в установці. Визначити ціни поділок шкал вимірювальних приладів.

2. З дозволу викладача включити електроживлення нагрівача. Установити задану потужність.

3. Для того щоб переконатися, що установився стаціонарний тепловий режим, слід через 40...50 хв. після включення установки (або переключення на нову потужність) заміряти ЕРС гарячого спаю термопар і через 5 хв. повторити вимір. Якщо результати повторного вимірювання збігаються з результатами першого або температура поверхні змінилась лише на 1°C, то стаціонарний режим настав.

4. Потужність нагрівача і ЕРС термопар при наявності стаціонарного режиму занести у таблицю вимірювань (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Таблиця вимірювань

№ п/п	Вимірювальні величини	Режими	
		I	II
1.	Потужність нагрівача $P, \text{ Вт}$		
2.	ЕРС гарячого спаю термопар	$E_1, \text{ мВ}$	
		$E_2, \text{ мВ}$	
		$E_3, \text{ мВ}$	
3.	Осереднена ЕРС $E_{cp}, \text{ мВ}$		
4	$E_{сум} = E_{cp o} + E_k, \text{ мВ}$		
5.	Температура поверхні теплообміну $t, \text{ }^\circ\text{C}$		
6.	Температура у кімнаті (навколишнього середовища)	$t_k, \text{ }^\circ\text{C}$	
		$T_k, \text{ К}$	

$$E_k, \text{ мВ} =$$

5. Встановити на нагрівачі більшу потужність. Продовжити дослідження за нової потужності згідно п.п. 3 та 4.

6. По закінченню роботи установити ЛАТР в "0"- положення напруги та вимкнути установку.

7. Провести обробку результатів експерименту, заповнити таблицю розрахунків (табл. 2.2).

Розрахунки дослідних даних

1. За допомогою термометра, що знаходиться в лабораторії, визначити температуру навколишнього середовища - температуру холодного спаю термопар t_k .

2. З таблиць градування термопар (додатки 1 або 2), визначити значення ЕРС холодного спаю вашої термопар E_k .

3. Визначити середнє значення ЕРС термопар для кожного режиму роботи E_{cp} .

4. Визначити виправлені середні значення ЕРС термопар E_{cpo} , враховуючи значення опорів термопар та мілівольтметра. Знайти $E_k + E_{cpo}$.

5. З таблиці градування термопар визначити відповідну температуру поверхні теплообміну $t = t_c$.

6. Визначити температурний напір $\Delta t = t_c - t_p$.

7. Визначити середню температуру пристінного шару $t_{cp} = 0,5 (t_c + t_p)$.

Таблиця 2.3

Таблиця розрахунків

№ п/п	Розраховані величини	Режими	
		I	II
1.	Температура поверхні теплообміну $t, ^\circ\text{C}$ T, K		
2.	Температурний напір $\Delta t = t - t_k, ^\circ\text{C}$		
3.	Середня температура пристінного шару (визначальна температура) $t_{cp} = (t + t_k)/2, ^\circ\text{C}$		
4.	Тепловий потік, що виділяється нагрівачем $Q = P, \text{Вт}$		
5.	Тепло, що передається випромінюванням $Q_6, \text{Вт}$		
6.	Тепловий потік, що передається конвекцією $Q_k, \text{Вт}$		
7.	Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{експ.}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К})$		
8.	Критерій Прандтля Pr		
9.	Критерій Грасгофа Gr		
10.	Добуток (Критерій Релея) $Pr Gr = Ra$		
11.	Показник критеріального рівняння n		
12.	Коефіцієнт C		
13.	Критерій Нуссельта Nu		
14.	Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{теор.}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \text{К})$		

8. Визначити тепловий потік, що підводиться до поверхні теплообміну Q . При стаціонарному тепловому режимі (якщо знехтувати тепловими втратами в установці) можна вважати, що тепловий потік Q дорівнює потужності P , яка виділяється на нагрівачі. Теплота передається в навколишнє середовище частково шляхом випромінювання, частково шляхом конвекції.

9. Кількість теплоти, що передається в навколишнє середовище шляхом випромінювання, визначається за законом Стефана-Больцмана:

$$Q_6 = \varepsilon \cdot C_0 \cdot F \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right],$$

де ε - ступінь чорноти поверхні труби, $\varepsilon \approx 0,95$;

C_0 - коефіцієнт випромінювання АЧТ $C_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{К}^4)$;

T - температура поверхні теплообміну, К;

T_o - температура навколишнього середовища, К;

F - площа поверхні теплообміну $F = \pi d l$, м²

10. Теплота, що передається конвекцією визначається за формулою Ньютона-Ріхмана: $Q_k = \alpha F (t - t_o)$. Звідси, експериментальний коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{експ} = \frac{Q_k}{F(t - t_o)},$$

де $Q_k = Q - Q_e$.

11. Для кожного режиму визначити критерії подібності Грасгофа Gr , Прандтля Pr . Значення λ , ν , μ , C_p взяти з таблиці "Фізичні властивості повітря" (див. додаток 7) для середньої температури пристінного шару.

12. Обчислити величини добутоків $Gr Pr$ для всіх режимів. Залежно від добутку $Gr Pr$ визначити значення C та n в критеріальному рівнянні Михеєва для вільної конвекції: $Nu = C (Gr Pr)^n$ (див. додаток 6 або табл. 2.1).

13. Знайти значення числа Нусельта з універсального критеріального рівняння Михеєва для вільної конвекції (2.3).

14. За критерієм Нусельта знайти теоретичний коефіцієнт тепловіддачі

$$\alpha_{теор} = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}.$$

15. Порівняти отримані значення експериментального і теоретичного коефіцієнтів тепловіддачі і з'ясувати причини можливого розходження.

16. Оформити звіт і підготуватися до співбесіди з викладачем за результатами роботи.

Контрольні запитання

1. Надати визначення конвекції та її видів (вільна, вимушена).
2. Тепловіддача. Коефіцієнт тепловіддачі. Основний закон тепловіддачі.
3. Критерії подібності, їх фізичний сенс.
4. Правила визначення критеріїв подібності.
5. Охарактеризувати режими течії рідин і газів та їх вплив на тепловіддачу.
6. Визначення режимів течії та їх врахування у критеріальних рівняннях.
7. Критеріальне рівняння для вільної конвекції.
8. Критеріальні рівняння для інших видів конвекції.
9. Експериментальний та теоретичний розрахунок коефіцієнта тепловіддачі.

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВІДДАЧІ ВІД ВЕРТИКАЛЬНОЇ ТРУБИ В УМОВАХ ВІЛЬНОЇ КОНВЕКЦІЇ

Теоретичний вступ

Тепловіддача від вертикальної труби в умовах природної (вільної) конвекції здійснюється механізмами конвекції та випромінювання, тобто є одним з видів складного теплообміну. Сумарний тепловий потік Q в одиницю часу (потужність тепловіддачі, Вт) від поверхні площею $F = \pi d l$ (d - зовнішній діаметр, l - довжина труби) з температурою стінки t_c до навколишнього середовища – повітря з температурою t_o визначається як

$$Q = Q_k + Q_p = \alpha \cdot (t_c - t_o) + C_o \cdot \varepsilon \cdot \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \quad (3.1)$$

де Q_k - потужність конвективного теплообміну при коефіцієнті тепловіддачі α і середньому температурному напорі Δt ($\Delta t = t_c - t_o$), Q_p - потужність радіаційного теплообміну (теплого випромінювання) між поверхнею, яка віддає тепло і має середню температуру $T_c = t_c + 273$ і навколишнім середовищем - повітрям з температурою $T_o = t_o + 273$ за ступені чорноти поверхні ε ; $C_o = 5.67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4)$ коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Середня температура поверхні T_c і середній температурний напір Δt можуть бути визначені експериментальним шляхом за вимірними значеннями температури в декількох точках уздовж поверхні циліндричної труби:

$$T_c = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i, \quad T_i = t_i + 273, \quad (3.2)$$

де t_i - значення температур ($^{\circ}\text{C}$), які виміряні в точках уздовж труби.

$$\Delta t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta t_i, \quad (3.3)$$

де $\Delta t_i = t_i - t_o$ – місцевий температурний напір.

Температура повітря у лабораторії t_o визначається за лабораторним термометром. Можна вважати, що ступінь чорноти для поверхні труби, яка вкрита сажею дорівнює $\varepsilon = 0,95$.

Сумарна потужність тепловіддачі Q у стаціонарному режимі може бути безпосередньо заміряна ватметром у колі живлення нагрівача, оскільки в даній лабораторній роботі нагрівач розміщено повністю всередині труби і тому потужність, що він споживає, практично повністю витрачається на

нагрів труби, тепловіддачу та випромінювання (якщо знехтувати втратами потужності на теплопровідність в місці приєднання труби до підставки).

Таким чином, замірявши розподіл температури на поверхні труби у стаціонарному тепловому режимі, тобто після досягнення постійних за часом (стаціонарних) значень температури, можна обчислити експериментально коефіцієнт конвекційної тепловіддачі $\alpha_{експ}$ за формулою, яка виходить з (3.1):

$$\begin{aligned} \alpha_{експ} &= \frac{Q_{\kappa}}{F \cdot \Delta t} = \frac{Q - Q_{\epsilon}}{F \cdot \Delta t} = \frac{Q - C_o \epsilon \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \cdot F}{F \cdot \Delta t} = \\ &= \frac{Q}{F \cdot \Delta t} - \frac{C_o \cdot \epsilon}{\Delta t} \left[\left(\frac{T}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_o}{100} \right)^4 \right]. \end{aligned} \quad (3.4)$$

Для підвищення надійності результатів дослідження тепловіддачі описаним способом доцільно буде порівняти їх з теоретичною оцінкою. Така оцінка може бути отримана за допомогою універсального критеріального рівняння Михєєва для тепловіддачі в умовах вільної конвекції:

$$Nu = C (Gr Pr)^n, \quad (3.5)$$

де Nu , Gr , Pr - критерії Нусельта, Грасгофа і Прандтля, відповідно (визначення цих величин дивись в лабораторній роботі ТП-2). C та n - константи, що залежать від добутку $(Gr Pr)$ (див. додаток 6).

Величина Nu безпосередньо пов'язана з α співвідношенням

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (3.6)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності повітря, l - характерний (визначальний) лінійний розмір поверхні (для вертикальної труби - її висота).

Таким чином,

$$\alpha_{теор} = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}. \quad (3.7).$$

Величина Nu визначається з критеріального рівняння (3.5).

Мета даної лабораторної роботи полягає у визначенні (за формулою (3.4)) коефіцієнта конвекційної тепловіддачі від вертикальної нерівномірно нагрітої труби при різних потужностях її нагріву (тобто, при різних значеннях середнього температурного напору) і за порівняння отриманих експериментальних значень з теоретичною оцінкою за формулою (3.7).

Експериментальна установка

Схему лабораторної установки представлено на рисунку 3.1.

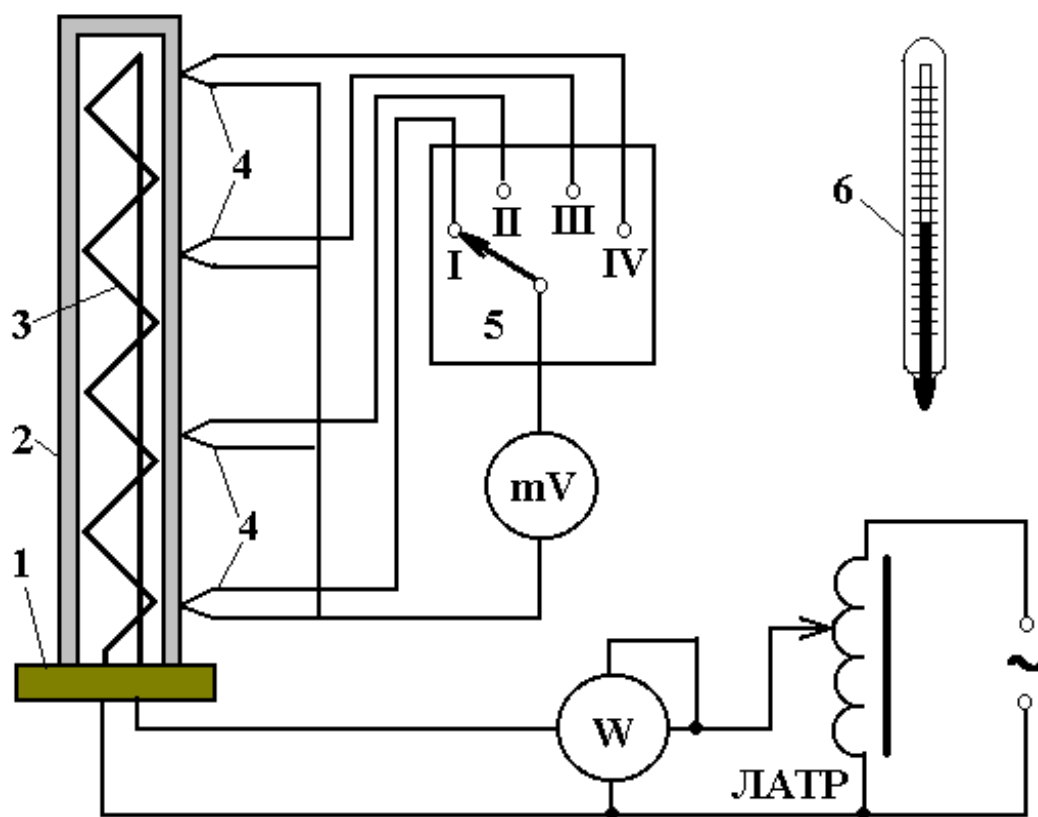


Рисунок 3.1. Схема експериментальної установки

У середині закріпленої на підставці 1 вертикальної алюмінієвої труби 2 з зачорненою поверхнею змонтовано електричний нагрівач 3, що створює нерівномірний нагрів поверхні труби. Живлення нагрівача здійснюється від лабораторного автотрансформатора (ЛАТР); потужність, що споживається нагрівачем вимірюється ватметром W. Температура поверхні труби вимірюється в чотирьох місцях уздовж неї за допомогою термопар 4. Відлік значень термо-ЕРС здійснюється за допомогою мілівольтметра mV з використанням перемикача термопар 5. Температура повітря у приміщенні визначається за лабораторним термометром 6.

Порядок виконання роботи

1. Перевірити цілісність з'єднань електричної схеми. З дозволу викладача підключити ЛАТР до мережі 220 В.

2. Встановити за допомогою ЛАТРа і ватметра потужність нагріву Q_1 ; перемикач термопар встановити в положення I.

3. Стежити за зміною показань мілівольтметра з часом. Після досягнення стаціонарного режиму (коли температурне поле труби стане незмінне за часом) послідовно зняти показання мілівольтметра при положеннях перемикача термопар I, II, III і записати їх у таблицю вимірювань (табл.3.1). Після цього встановити за допомогою ЛАТР і ватметра нове значення потужності нагріву Q_2 і повернути перемикач термопар в положення I.

4. За час 30...50 хв., який необхідний для встановлення стаціонарного теплового режиму за нового значення Q , виконати наступні розрахунки:

- визначити з градууювальної таблиці термопар (див. додаток) значення Δt для всіх чотирьох термопар і записати їх у таблицю вимірювань;
- визначити відповідні значення температури t на поверхні труби ($t = t_0 + \Delta t$) і записати їх у таблицю вимірювань (табл.3.1);
- обчислити середні значення $t = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n t_i$ і $T = t + 273$ і записати в таблицю розрахунків (табл.3.2);
- обчислити $\alpha_{експ}$ за формулою (3.4) і $\alpha_{теор}$ за формулою (3.7). Записати отримані результати в таблицю розрахунків.

5. Після досягнення стаціонарного теплового режиму при Q_2 послідовно зняти показання мілівольтметра при положеннях перемикача I - III і записати їх в таблицю вимірювань.

6. Провести розрахунки за п. 4 для потужності $Q = Q_2$ і записати їх результати в таблиці вимірювань і розрахунків.

7. Після закінчення вимірів показати результати викладачу. За необхідністю перевірити результати вимірювань.

8. Вивести ЛАТР в нульове положення і відключити його від живлення.

9. Порівняти результати обчислення $\alpha_{експ}$ і $\alpha_{теор}$, зробити висновок про точність теоретичної оцінки α в умовах даного експериментального дослідження. Зробити висновок про характер залежності α від Q , тобто від середньої температури поверхні труби t .

10. Оформити звіт і підготуватися до співбесіди.

Таблиця 3.1

Таблиця вимірювань

$t_0 =$ °C

Потужність нагріву	Номер термопар											
	I			II			III			середнє		
	$E,$ mV	$\Delta t,$ °C	$t,$ °C	$E,$ mV	$\Delta t,$ °C	$t,$ °C	$E,$ mV	$\Delta t,$ °C	$t,$ °C	$E,$ mV	$\Delta t,$ °C	$t,$ °C
$Q_1 =$												
$Q_2 =$												

Таблиця розрахунків

$$\varepsilon = 0,95, C_o = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \text{ К}^4), d = 0,035 \text{ м}, l = 0,75 \text{ м}$$

№ з/п	Вимірювані величини	Потужність нагрівача Q , Вт	
		$Q_1 =$	$Q_2 =$
1	Середня температура поверхні труби \bar{t} , °С		
2	Середня температура поверхні труби \bar{T} , К		
3	Середній температурний напір $\Delta t = t - t_0$, °С		
4	Середня температура пристінного шару $t_{cp} = 0,5 (t + t_0)$, °С		
5	Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{експ.}$, Вт/(м ² К)		
6	Критерій Прандтля Pr		
7	Критерій Грасгофа Gr		
8	Добуток (Критерій Релея) $Pr Gr$		
9	Показник критеріального рівняння n		
10	Коефіцієнт C		
11	Критерій Нусельта Nu		
12	Коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_{теор.}$, Вт/(м ² К)		

Контрольні запитання

1. Конвекція (вільна, вимушена).
2. Тепловіддача. Коефіцієнт тепловіддачі. Основний закон тепловіддачі.
3. Критерії подібності, їх фізичний сенс.
4. Правила визначення критеріїв подібності.
5. Визначення режимів течії та їх врахування у критеріальних рівняннях.
6. Критеріальне рівняння для вільної конвекції.
7. Критеріальні рівняння для інших видів конвекції.
8. Експериментальний та теоретичний розрахунок коефіцієнта тепловіддачі

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОМЕНИСТОГО ТЕПЛООБМІНУ МІЖ ТВЕРДИМИ ТІЛАМИ

Теоретичний вступ

Тепловим випромінюванням (або радіаційним теплообміном) зветься процес, який складається з перетворення внутрішньої енергії тіла на енергію електромагнітних хвиль, розповсюдження її в просторі та поглинання іншими тілами. Джерелом теплового випромінювання є внутрішня енергія тіла. Теплота випромінюється всіма тілами, температура яких перевищує 0 К.

Тепловий потік, який випромінюється на всіх довжинах хвиль з одиниці поверхні тіла в усіх напрямках, є *поверхневою густиною потоку інтегрального випромінювання* E . Вона вимірюється у $\text{Вт}/\text{м}^2$ і залежить від стану поверхні даного тіла і його температури. Чим вище температура, тим інтенсивніше випромінювання.

Для випромінювання $E_{\text{над}}$, що падає на тіло, частина поглинається (E_A), частина відбивається (E_R) і частина проникає крізь нього (E_D). Таким чином, маємо з рівняння енергетичного балансу: $A+R+D = 1$, де $A = E_A/E_{\text{над}}$ - коефіцієнт поглинання, $R = E_R/E_{\text{над}}$ - коефіцієнт відбиття, $D = E_D/E_{\text{над}}$ - коефіцієнт пропускання.

Тіло, яке поглинає все випромінювання, що падає на нього, зветься *абсолютно чорним* - АЧТ. Для нього $A = 1$ і $R = D = 0$. Виділяють також *абсолютно білі* ($R = 1$) та *абсолютно прозорі* ($D = 1$) тіла. Абсолютно чорних, білих і прозорих тіл у природі не існує, тому реальні тіла мають назву “сірих”.

Закономірності теплового випромінювання визначаються законами Планка, Стефана-Больцмана, Кірхгофа.

Згідно **закону Стефана-Больцмана** кількість енергії, що випромінюється з 1 м^2 поверхні абсолютно чорного тіла, визначається як

$$E_o = \sigma_o T^4 \quad \text{або} \quad E_o = C_o \left(\frac{T}{100} \right)^4, \quad (4.3)$$

де E_o - кількість енергії, що випромінюється з 1 м^2 поверхні АЧТ, ($\text{Вт}/\text{м}^2$);

T - абсолютна температура поверхні тіла, К;

$\sigma_o = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - стала Стефана-Больцмана;

$C_o = \sigma_o \cdot 10^8 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ - коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Реальні (“сірі”) тіла випромінюють менше теплової енергії, ніж абсолютно чорне тіло при тій же температурі.

Відношення поверхневої густини потоку інтегрального випромінювання E даного тіла до поверхневої густини потоку інтегрального випромінювання E_0 АЧТ при тій же температурі зветься *ступенем чорноти* цього тіла ε :

$$\varepsilon = E / E_0 \quad (4.4)$$

Ступінь чорноти ε змінюється для різноманітних тіл від 0 до 1 залежно від матеріалу, стану поверхні і температури.

Таким чином, закон Стефана-Больцмана для реального тіла:

$$E = \varepsilon E_0 = \varepsilon \cdot C_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (4.5)$$

де $C = \varepsilon C_0$ – коефіцієнт випромінювання реального (“сірого”) тіла.

Тепловий потік Q при теплообміні випромінюванням між двома паралельними пластинами, які мають площу F , знаходиться за формулою:

$$Q = \varepsilon_{3\phi} \cdot C_0 \cdot F_1 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \quad (4.6)$$

де T_1 і T_2 – абсолютні температури поверхонь пластин;

$$\varepsilon_{3\phi} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} - \text{зведений ступінь чорноти системи тіл 1 і 2;}$$

ε_1 та ε_2 – ступені чорноти кожної поверхні.

Згідно із *законом Кірхгофа* відношення випромінювальної і поглинальної здатності при тепловій рівновазі не залежить від природи тіла і дорівнює енергії випромінювання абсолютно чорного тіла при тій самій температурі:

$$\frac{E}{A} = E_0 = C_0 \cdot \left(\frac{T}{100} \right)^4.$$

Оскільки $E = \varepsilon E_0$ і $E = A E_0$, то маємо для будь-яких поверхонь та їх частин: $A = \varepsilon$.

Метою лабораторної роботи є експериментальне визначення ступеня чорноти та енергії випромінювання “сірої” металеві пластины.

Експериментальна установка

Лабораторна установка для експериментального визначення ступеня чорноти і випромінювальної здатності твердого тіла являє собою стенд, на якому змонтовано випромінювачі, приймальники променистої енергії, прилади та інше обладнання, що необхідне для проведення експерименту (рис.4.1).

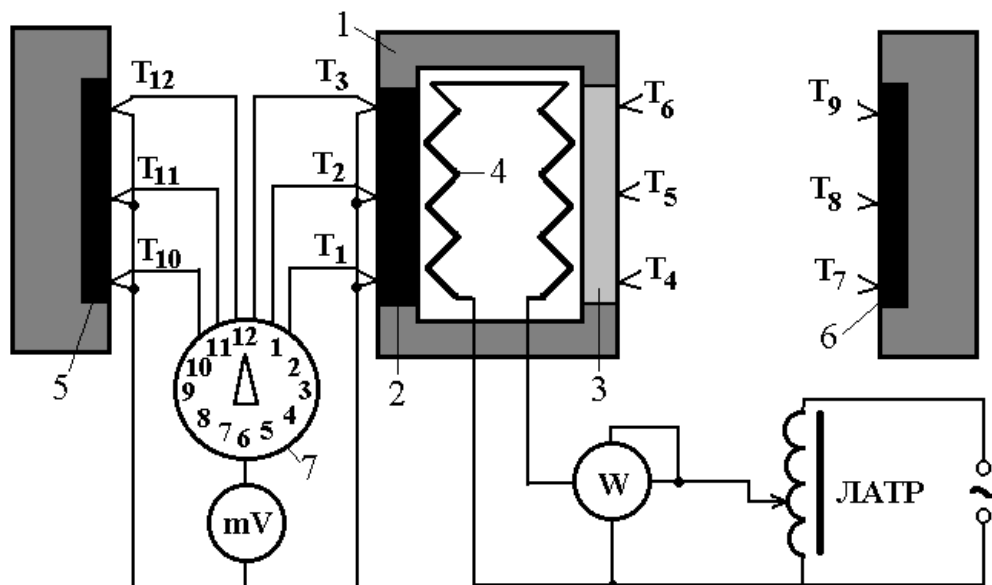


Рисунок 4.1. Схема експериментальної установки.

Випромінювач (1), що виконаний у вигляді двох металевих пластин (2) і (3), між якими розміщено електронагрівач (4), встановлений між двома приймачами теплового випромінювання (5) і (6) на однаковій відстані від них. Поверхня пластини (2) випромінювача вкрита шаром сажі, поверхня (3) залишена чистою. Ступінь чорноти чорної пластини випромінювача $\varepsilon=0,95$. Ступінь чорноти чистої пластини підлягає визначенню. Електронагрівач (4) включений у коло змінного струму через лабораторний автотрансформатор (ЛАТР), за допомогою якого регулюється потужність. Величина потужності вимірюється ватметром W. Температура кожної поверхні заміряється за допомогою термопар $T_1 - T_{12}$, які підключено через перемикач (7) до мілівольтметра mV.

Термопари 1 - 3 - вимірюють ЕРС чорної пластини випромінювача;
4 - 6 - сірої пластини випромінювача;
7 - 9 - приймача сірої пластини;
10 - 12 - приймача чорної пластини.

Питомий тепловий потік між випромінювачем і приймачем визначається як

$$q = C_o \varepsilon_{зв} \cdot \left[\left(\frac{T_{вин}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{np}}{100} \right)^4 \right], \quad (4.7)$$

де $\varepsilon_{зв} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{вин}} + \frac{1}{\varepsilon_{np}} - 1}$ – зведений ступінь чорноти системи “випромінювач-приймач”;

$\varepsilon_{вин}$ - ступінь чорноти поверхні випромінювача;

ε_{np} - ступінь чорноти поверхні приймача;

$T_{вин}$ і T_{np} - абсолютні температури поверхні випромінювача і приймача, відповідно, К.

Оскільки поверхня приймачів теплового випромінювання вкрита шаром сажі, то їхній ступінь чорноти близький до 1 ($\varepsilon_{np} \approx 1$), тобто $\varepsilon_{зв} \approx \varepsilon_{вин}$.

При настанні стаціонарного теплового режиму теплові струми будуть однаковими, тобто

$$q = C_o \varepsilon_{зв1} \cdot \left[\left(\frac{T_{вин1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{np1}}{100} \right)^4 \right] = C_o \varepsilon_{зв2} \cdot \left[\left(\frac{T_{вин2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{np2}}{100} \right)^4 \right],$$

де $\varepsilon_{вин1}$ - ступінь чорноти чорної пластини випромінювача $\varepsilon_{вин1} = 0,95$; $\varepsilon_{вин2}$ - ступінь чорноти сірої пластини випромінювача, яку необхідно знайти; $T_{вин1}$, $T_{вин2}$ - абсолютні температури поверхонь чорної і сірої пластин випромінювача, К; T_{np1} , T_{np2} - абсолютні температури поверхонь приймачів випромінювання, К.

Таким чином, ступінь чорноти поверхні випромінювача, що досліджується:

$$\varepsilon_{вин2} = \varepsilon_{вин1} \cdot \frac{\left(\frac{T_{вин1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{np1}}{100} \right)^4}{\left(\frac{T_{вин2}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{np2}}{100} \right)^4}. \quad (4.8)$$

А поверхнева густина потоку інтегрального випромінювання (випромінювальна здатність) поверхні, що досліджується:

$$E_{вин2} = C_o \varepsilon_{зв2} \cdot \left(\frac{T_{вин2}}{100} \right)^4. \quad (4.9)$$

Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з експериментальною установкою. Визначитися з кількістю пластин та термопар в установці, їх розподілом. Визначити ціну поділки шкал вимірювальних пристроїв.

2. Заготовити бланки “Таблиця вимірювань” (табл.4.1) і “Таблиця розрахунків” (табл.4.2). Визначитися з порядком заповнення таблиці вимірювань стосовно переключень перемикача термопар та номеру режимів.

3. Після одержання допуску до роботи та з дозволу викладача ввімкнути установку в мережу 220 В і встановити за допомогою ЛАТР перший режим роботи установки. Потужність режиму контролюється ватметром W (орієнтовні значення потужностей режимів: 75, 125 і 200 Вт).

4. При досягненні стаціонарного теплового режиму (показання стрілки мілівольтметра mV має бути сталим протягом 5...10 хв.) зняти показання мілівольтметра для всіх термопар і занести їх у таблицю вимірювань.

5. Повторити експеримент у інших режимах роботи, послідовно збільшуючи потужність нагрівача (див. п. 4).

6. Після проведення експерименту вивести ЛАТР в нульове положення і вимкнути установку.

Таблиця 4.1

Таблиця вимірювань

Пластина випромінювача	№ режиму	ЕРС термопар випромінювача, mV				Т-ра випромін. °С	ЕРС термопар приймача, mV				Т-ра приймача °С
		1	2	3	сер.		1	2	3	сер.	
Чорна	1.										
	2.										
	3.										
Сіра	1.										
	2.										
	3.										

$$t_k = \quad \text{°С}$$

7. Провести обробку досліджених даних:

- визначити середньоарифметичні значення ЕРС усіх термопар пластин для кожного режиму;

- за середніми значеннями ЕРС термопар визначити середні значення температури на поверхнях пластин випромінювача і приймачів за допомогою таблиці для градування термопар із урахуванням всіх поправок (див. Додаток 3);

- визначити абсолютні значення температур усіх пластин $T = t + 273$ і записати в таблицю розрахунків (табл.4.2);

- для кожного режиму роботи згідно з формулами (4.8) і (4.9) визначити значення ступеня чорноти пластини, що досліджується, $\varepsilon_{\text{вип}2}$ та її випромінювальну здатність $E_{\text{вип}2}$;

- побудувати графік залежності випромінювальної здатності тіла від його температури $E_{\text{вип}2} = f(T_{\text{вип}2})$. Пояснити поведінку кривої у всьому діапазоні значень температури – від 0 К;

- визначити питомий тепловий потік q (4.7) для сірого тіла, включаючи кімнатну температуру, та теж нанести його на графік. Пояснити графік порівняно з графіком $E_{\text{вип}2}$.

8. Оформити звіт і підготуватися до співбесіди та захисту роботи.

Таблиця 4.2

Таблиця розрахунків

№ режиму	Т-ра чорного випромінювача, $T_{\text{вип}1}$, К	Т-ра чорного приймача, $T_{\text{пр}1}$, К	Т-ра сірого випромінювача, $T_{\text{вип}2}$, К	Т-ра сірого приймача, $T_{\text{пр}2}$, К	Ступінь чорноти, $\varepsilon_{\text{вип}2}$	Випромінювальна здатність, $E_{\text{вип}2}$, Вт/м ²	Тепловий потік, q , Вт/м ²
1							
2							
3							

Контрольні запитання

1. Що зветься тепловим випромінюванням? Як відбувається передача енергії при випромінюванні?

2. Основні характеристики теплового випромінювання.

3. Поняття “ступінь чорноти”, “абсолютно чорне тіло”, “сіре тіло”.

4. Закон Планка.

5. Закон зміщення Вина.

6. Закон Стефана-Больцмана.

7. Закон Кірхгофа.

8. Вивести формулу для визначення ступеня чорноти пластини, що досліджується.

9. Пояснити поведінку кривих випромінювальної здатності $E_{\text{вип}2}$ та теплового потоку q у всьому діапазоні значень температури (від 0 К). Який закон відображає ця залежність?

ДОДАТКИ

Додаток 1

Таблиця градування термопар *хромель - конпель*
при температурі вільних кінців 0°C

Темпера- тура робочого спаю, °C	Термо - ЕРС, E mV									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0	0.07	0.13	0.20	0.26	0.33	0.39	0.46	0.52	0.59
10	0.65	0.72	0.78	0.85	0.91	0.98	1.05	1.11	1.18	1.24
20	1.31	1,38	1.44	1.51	1.57	1.64	1.70	1.77	1.84	1.91
30	1.98	2.05	2.12	2.18	2.25	2.32	2.38	2.45	2.52	2.59
40	2.66	2.73	2.80	2.87	2.94	3.00	3.07	3.14	3.21	3.28
50	3.35	3.42	3.49	3.56	3.63	3.70	3.77	3.84	3.91	3.98
60	4.05	4.12	4.19	4.26	4.33	4.41	4.48	4.55	4.62	4.69
70	4.70	4.83	4.90	4.98	5.05	5.12	5.20	5.27	5.34	5.41
80	5.48	5.56	5.63	5.70	5.78	5.85	5.92	5.99	6.07	6.14
90	6.21	6.29	6.36	6.43	6.51	6.58	6.65	6.73	6.80	6.87
100	6.95	7.03	7.10	7.17	7.25	7.32	7.40	7.47	7.54	7.62
110	7.69	7.77	7.84	7.91	7.99	8.06	8.13	8.21	8.28	8.35
120	8.43	8.50	8.58	8.65	8.73	8.80	8.88	8.95	9.03	9.10
130	9,18	9,25	9,32	9,40	9,48	9,55	9,63	9,70	9,78	9,85
140	9,93	10,01	10,08	10,16	10,24	10,32	10,39	10,47	10,55	10,62
150	10,70	10,78	10,86	10,93	11,01	11,09	11,17	11,24	11,32	11,40

Щоб визначити температуру за даними термо - ЕРС даної термопарі, потрібно знайти у таблиці найближче значення та за першим стовпчиком рядка визначити десятки градусів температури, а за номером стовпчика - одиниці градусів температури в °C.

Докладніше дивіться додаток 3 та лабораторну роботу ТД- 1.

Таблиця градування термопар *хромель - алюмель*
при температурі вільних кінців 0 °С

Температура робочого спаю, °С	Термо – ЕРС, мВ									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-30	-1,14	-1,18	-1,21	-1,25	-1,28	-1,32	-1,36	-1,40	-1,43	-1,46
-20	-0,77	-0,81	-0,84	-0,88	-0,92	-0,96	-0,99	-1,03	-1,07	-1,10
-10	-0,39	-0,43	-0,47	-0,51	-0,55	-0,59	-0,62	-0,66	-0,70	-0,74
0	0	-0,04	-0,08	-0,12	-0,16	-0,20	-0,23	-0,27	-0,31	-0,35
0	0	0,04	0,08	0,12	0,16	0,20	0,24	0,28	0,32	0,36
10	0,40	0,44	0,43	0,52	0,56	0,60	0,64	0,68	0,72	0,76
20	0,80	0,84	0,88	0,92	0,96	1,00	1,04	1,08	1,12	1,16
30	1,20	1,24	1,28	1,32	1,36	1,41	1,45	1,49	1,53	1,57
40	1,61	1,65	1,69	1,73	1,77	1,82	1,86	1,90	1,94	1,98
50	2,02	2,06	2,10	2,14	2,18	2,23	2,27	2,31	2,35	2,39
60	2,43	2,47	2,51	2,56	2,60	2,64	2,68	2,72	2,77	2,81
70	2,85	2,89	2,93	2,97	3,01	3,06	3,10	3,14	3,18	3,22
80	3,26	3,30	3,34	3,39	3,43	3,47	3,51	3,55	3,60	3,64
90	3,68	3,72	3,76	3,81	3,85	3,89	3,93	3,97	4,02	4,06
100	4,10	4,14	4,18	4,22	4,26	4,31	4,35	4,39	4,43	4,47
110	4,51	4,55	4,59	4,63	4,67	4,72	4,76	4,80	4,84	4,88
120	4,92	4,96	5,00	5,04	5,08	5,13	5,17	5,21	5,25	5,29
130	5,33	5,37	5,41	5,45	5,49	5,53	5,57	5,61	5,65	5,69
140	5,73	5,77	5,81	5,85	5,89	5,93	5,97	6,01	6,05	6,09
150	6,13	6,17	6,21	6,25	6,29	6,33	6,37	6,41	6,45	6,49

Щоб визначити температуру за даними термо - ЕРС даної термопарі, потрібно знайти у таблиці найближче значення та за першим стовпчиком рядка визначити десятки градусів температури, а за номером стовпчика - одиниці градусів температури в °С.

Докладніше дивіться додаток 3 та лабораторну роботу ТД- 1.

ПОРЯДОК ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ЗА ВЕЛИЧИНОЮ ТЕРМО - ЕРС ТЕРМОПАРИ

Якщо другий вільний спай термопары знаходиться при температурі 0 °С (у льоді, що тоне або термостаті), то величина температури робочого спаю визначається за стандартним градуванням даної термопары (дивися додатки 1 і 2). Однак часто термопара підключається до приладу або перемикача безпосередньо, тобто другий ("холодний", вільний) спай знаходиться при кімнатній температурі t_k . Тому необхідно правильно визначати температуру об'єкту, знаючи значення кімнатної температури t_k .

У цьому випадку *порядок розрахунку температури* наступний:

1. Заміряти температуру у кімнаті t_k , °С.
2. За таблицею градування робочої термопары (додаток 1 або 2) визначити величину напруги E_k , що відповідає цій температурі t_k .

3. Заміряти термо - ЕРС E від термопары вимірювальним приладом. При декілька термопарах визначити їх середнє значення ЕРС з точністю $\pm 0,01$ мВ.

4. Визначити виправлену величину термо- ЕРС E_o термопары за формулою

$$E_o = E ((1 + r/R),$$

де r - електричний опір термопары;

R - опір вимірювального приладу;

E - напруга на клеммах вимірювального приладу (зміряна).

5. Скласти всі термо - ЕРС:

$$E_c = E_o + E_k$$

6. З таблиці градування робочої термопары за значенням сумарної ЕРС E_c визначити температуру об'єкта (t , °С)

7. При подальших вимірюваннях температури повторювати всі операції, починаючи з п. 3.

Примітка: Якщо $R/r > 100$, то розрахунки за п. 4 можна опустити і $E_o \cong E$.

Ця умова звичайно виконується для потенціометрів і цифрових вимірювальних приладів.

ВИМІРЮВАННЯ ТЕРМО - ЕРС ЗА ДОПОМОГОЮ ПЕРЕНОСНОГО ПОТЕНЦІОМЕТРА типу ПП-63

Переносний потенціометр ПП-63 (далі - прилад) призначений для вимірювання малих ЕРС та точного регулювання напруги у межах від 0 до 100 мВ з точністю 0,05 %.

Розглянемо роботу приладу при вимірюванні ЕРС (термо -ЕРС).

1. Початкові установлення приладу:

- тумблер "Питание вкл." у положенні "выкл";
- тумблер "Н/В" (зовнішній (наружный) /внутрішній) у положення "В" (внутрішній);
- перемикач режимів роботи у положенні "Потенциометр", металевий стрижень-шунт у положенні "*1";
- перемикач зовнішніх опорів (0... 25 Ом) у положення 5 Ом.
- перевіряємо установку нуля гальванометра приладу. За необхідності - її корегуємо.
- напруга , що вимірюється, підключається до клем "X".

2. Включаємо прилад тумблером " Питание вкл.".

Встановлюємо робочий струм у внутрішньому джерелі напруги приладу. Тумблер "К/И" (контроль / вимірювання) ставимо у положення "К." Натиснувши кнопку "Грубо" ручками "Робочий струм" ("Грубо" - верхня, "Точно" нижня ручка) встановлюємо стрілку приладу на нуль. Відпустивши кнопку "Грубо" і натиснувши кнопку "Точно" уточнити настанову робочого струму. Тумблер "К/И" повернути у положення "И" (измерение).

8. *Вимірювання* ЕРС у приладі здійснюється порівнянням ЕРС E_x , що вимірюється, з тією, що виробляється у приладі ЕРС E_o . При їхній рівності і протилежності за напрямом [на гальванометр подається сигнал пропорційний $E_x + (\pm E_o)$] гальванометр встановлюється на нуль. Величина ЕРС E_o внутрішнього джерела відлічується зі ступінчастого перемикача (кратного 2 мВ) і плавного регулятора (0... 2 мВ) і дорівнює їхній сумі. Якщо стрижень-шунт знаходиться у положення "*2" або "*0, 5", то заміряна величина E_x помножується на цей множник.

Вимірювання ЕРС здійснюється наступним чином:

- натиснувши кнопку "Грубо", встановити стрілку приладу на нуль з допомогою ступінчастого перемикача і плавного регулятора;

Закінчення додатку 4

- натиснувши кнопку "Точно", плавним регулятором уточнити величину ЕРС, що вимірюється, встановивши стрілку гальванометра на нуль;
 - відлічити і записати показання приладу;
 - періодично перевіряти робочий струм приладу (п. 2).
4. По закінченню вимірювань перевірити відтиснення кнопок "Точно" і "Грубо". Вимкнути живлення приладу.

Примітки:

1. Час установлення показань стрілкою гальванометра складає близько 5 ... 7 секунд. Тому після уточнення показань плавним регулятором необхідно виждати 5... 10 секунд, поки встановляться показання гальванометра.

2. Перед компенсацією сигналу на збільшення ЕРС стрілка повинна відхилитися ліворуч, а на зменшення - праворуч. Якщо стрілка відхиляється праворуч, а на ручках регулювання нулі (0 мВ), то необхідно переключити тумблер "+/-". (При цьому зміниться полярність сигналу на вході приладу E_X відносно сигналу, що виробляється у приладі E_0).

Додаток 5

ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОПОРУ З ДОПОМОГОЮ МОСТА Р333

Спрощена схема моста Р333

Міст постійного струму Р333 призначений для вимірювання електричного опору від 0,005 Ом до 999 900 Ом, при точності приладу 0,5 %. Вимірювальна схема (міст) містить четверо плечей, складених з опорів (дивися рисунок далі). До однієї діагоналі мосту (BD) підключається живлення E , до другої (AC) - гальванометр Г. роль одного плеча виконує опір R_X , що вимірюється, другого - 4 декадні перемикачі $П_1, П_4$, що дозволять встановити будь-який опір R від 0 Ом до 9999 Ом з кроком 1 Ом. За допомогою перемикача $П_5$ встановлюють величину множника $R_2^*/R_1^* = n$, кратного 10 (від 0,0001 до 100). Вимірювання величини опору зводиться до балансування мосту, тобто до установлення стрілки гальванометра Г на нуль, обертанням ручок перемикачів.

При балансуванні мосту виконується співвідношення: $R_X/R = R_2^*/R_1^* = n$, звідкіля одержимо: $R_X = R n$.

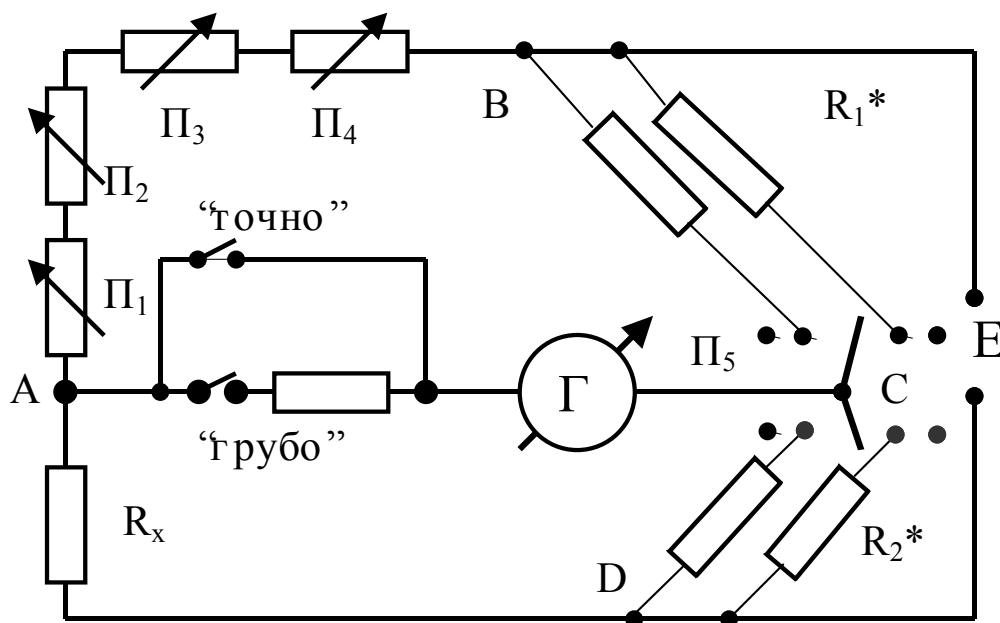


Рисунок. Спрощена схема моста P333

ПОРЯДОК ВИМІРЮВАННЯ ОПОРІВ

1. Підключаємо опір, що вимірюється до затискувачів R_x .
2. Перемикач режимів мосту поставити у положення "МВ" (вертикально). Включити прилад натиском і фіксацією у нижньому положенні (поворотом) кнопки "Вкл. Г" ((включити гальванометр).
3. Перемикачем Π_5 встановити значення множника n (рекомендується $n=0,01$).
4. Урівноважити (збалансувати) міст поворотами декадних перемикачів $\Pi_1 \dots \Pi_4$, натискаючи кнопки спочатку "Грубо", опісля - "Точно".

Примітка. При невідомому опорі R_x множник n вибирається так, щоб не було старших декад з нульовими значеннями, що забезпечує необхідну точність вимірювань.

Врівноважування мосту починати зі старшого розряду.

5. Обчислити величину опору за формулою $R_X = R n$, де R - опір на перемикачах $\Pi_1 \dots \Pi_4$, n - множник на перемикачі Π_5 .
6. Вимкнути живлення мосту, знявши фіксацію і віджав кнопку "Вкл. Г".

Значення констант C і n в рівнянні Міхєєва для вільної конвекції

$Gr Pr$	C	n	Примітка
$< 10^{-3}$	0,5	0	Теплообмін теплопровідністю
$10^{-3} \dots 500$	1,18	1/8	Ламінарний рух теплоносія
$500 \dots 2 \cdot 10^7$	0,54	1/4	Перехідний режим руху теплоносія
$2 \cdot 10^7 \dots 10^{13}$	0,135	1/3	Турбулентний рух теплоносія

Теплофізичні властивості сухого повітря

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$	$\mu \cdot 10^5, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
0	1,293	1,005	2,442	1,72	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,512	1,77	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,593	1,81	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,675	1,86	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,756	1,91	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,826	1,96	17,96	0,698
60	1,060	1,005	2,896	2,01	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,966	2,06	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,047	2,11	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,128	2,15	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,210	2,19	23,13	0,688

Теплофізичні властивості води

t , °C	p , бар	ρ , кг/м ³	C , кДж/(кг К)	λ , Вт/(м К)	$\nu 10^6$, м ² /с	$\beta 10^4$, К ⁻¹	Pr
За атмосферного тиску							
0	1.013	999.9	4.218	0.567	1.797	0.68	13.33
10	1.013	999.7	4.192	0.583	1.308	0.88	9.41
20	1.013	988.2	4.182	0.598	1.005	2.07	7.01
30	1.013	995.7	4.178	0.613	0.801	3.03	5.44
40	1.013	992.2	4.177	0.627	0.658	3.85	4.35
50	1.013	988.1	4.181	0.640	0.554	4.57	3.57
60	1.013	983.2	4.184	0.651	0.475	5.23	3.00
70	1.013	977.8	4.190	0.661	0.414	5.84	2.57
80	1.013	971.8	4.197	0.669	0.365	6.41	2.23
90	1.013	965.5	4.205	0.675	0.326	6.96	1.96
На лінії насичення							
100	1.013	958.4	4.216	0.680	0.295	7.50	1.75
110	1.433	951.0	4.233	0.683	0.268	8.04	1.60
120	1.958	943.7	4.250	0.685	0.252	8.64	1.47
130	2.701	934.8	4.266	0.686	0.233	9.19	1.35
140	3.614	926.1	4.287	0.685	0.217	9.72	1.26
150	4.760	917.0	4.313	0.684	0.203	10.3	1.17
160	6.108	907.4	4.346	0.681	0.191	10.7	1.10
170	7.920	897.2	4.380	0.676	0.181	11.3	1.05
180	10.03	886.3	4.417	0.672	0.173	11.9	1.03
190	12.55	876.0	4.459	0.664	0.165	12.6	0.97
200	15.55	863.0	4.505	0.568	0.158	13.3	0.93

❁ Українсько-російський словничок термінів ❁

Апарат теплообмінний	Аппарат теплообменный
Багатоатомний	Многоатомный
Багатошаровий	Многослойный
Вільний	Свободный
Вимір, вимірювання	Измерение
Вимушений	Вынужденный
Випарник, -ка, випаровувач	Испаритель
Випаровування	Испарение
Випромінювання	Излучение
~ теплове	~ тепловое
~ інфрачервоне (ІЧ)	~ инфракрасное (ИК)
Витрата	Расход
Властивість	Свойство
Внутрішня енергія	Внутренняя энергия
Втрата	Потеря
В'язкість, -кості	Вязкость
~ кінематична	~ кинематическая
~ динамічна	~ динамическая
Газ, -зу	Газ
~ двоатомний	~ двухатомный
~ ідеальний	~ идеальный
~ багатоатомний	~ многоатомный
~ одноатомний	~ одноатомный
~ реальний	~ реальный
Градуювання	Градуировка
Густина	Плотность
Двигун, -на	Двигатель
~ внутрішнього згорання (ДВЗ)	~ внутреннего сгорания (ДВС)
Дроселювання	Дроселирование
Електрони вільні	Электроны свободные
Електрорушійна сила (ЕРС)	Электродвижущая сила (ЭДС)
Ентальпія	Энтальпия
Живлення	Питание
Збереження	Сохранение
~ енергії	~ энергии
~ імпульсу	~ импульса
Зовнішній	Внешний
Зразок	Образец
Кипіння	Кипение

Кількість теплоти
Коефіцієнт корисної дії (ККД)

Конвективний
Конвекція
~ природна, вільна
~ вимушена
Конденсація
Корисна робота
Критеріальне рівняння
Критерій
Молекула
~ багатоатомна
~ двоатомна
~ одноатомна
Нагрівання
Нагрівач, - ча, нагрівник
Насичення
Об'єм
Оболонка
Опір
~ гідравлічний
~ електричний
~ термічний
Основа
Пара
Пароутворення
Переріз, -зу
Питомий
Повітря
Пограничний, пристінний (шар)
Поділка
Посудина, посуд
Потужність, -ності
Похибка
~ абсолютна
~ вимірювання
~ відносна
~ випадкова
Провідність
Променистий
Пузир, бульбашка
Речовина
Рівняння стану

Количество теплоты
Коэффициент полезного действия
(КПД)
Конвективный
Конвекция
~ естественная, свободная
~ вынужденная
Конденсация
Полезная работа
Критериальное уравнение
Критерий
Молекула
~ многоатомная
~ двухатомная
~ одноатомная
Нагревание
Нагреватель
Насыщение
Объем
Оболочка
Сопротивление
~ гидравлическое
~ электрическое
~ тепловое
Основание
Пар
Парообразование
Сечение
Удельный
Воздух
Пограничный (слой)
Деление
Сосуд
Мощность
Погрешность
~ абсолютная
~ измерения
~ относительная
~ случайная
Проводимость
Лучистый
Пузырек
Вещество
Уравнение состояния

Рідина	Жидкость
Рідинний	Жидкостный
Рідкий	Жидкий
Розрахунок, -ка	Расчет
Рух, -ху	Движение
~ броунівський	~ броуновское
~ обертовий	~ вращательное
~ коливальний	~ колебательное
~ поступальний	~ поступательное
Середовище	Среда
Сталий	Постоянный
Стінка	Стенка
~ одношарова	~ однослойная
~ багатошарова	~ многослойная
Стиснення, стиск, -ку	Сжатие
Суцільний	Сплошной
Температурний напір, -ру	Температурный напор
Температуропроводність	Температуропроводность
Тепловіддача	Теплоотдача
Тепловий потік	Тепловой поток
Теплоємність	Теплоемкость
~ питома	~ удельная
~ мольна	~ мольная
~ об'ємна	~ объемная
Теплообмін, -ну	Теплообмен
Теплообмінник, -ка	Теплообменник
Теплопередача	Теплопередача
Теплоприймач, ча	Теплоприемник
Теплопровідність, -ності	Теплопроводность
Термодинамічна система	Термодинамическая система
Термоелектрика	Термоэлектричество
Термометр, -ра	Термометр
~ газовий	~ газовый
~ рідинний	~ жидкостный
~ опору	~ сопротивления
Течія (рідини, газу)	Течение (жидкости, газа)
~ ламінарна (шарувата)	~ ламинарное (слоистое)
~ турбулентна (вихрова)	~ турбулентное (вихревое)
Тиск	Давление
Холодовидатність	Хладопроизводительность
Чутливість	Чувствительность
Шар, -ру	Слой
Швидкість, -кості	Скорость
Штучний	Искусственный

ЗМІСТ

Загальні рекомендації до проведення лабораторного практикуму	3
РОЗДІЛ I. Технічна термодинаміка. Основні поняття та закони.	5
<i>Лабораторна робота ТД- 1.</i> Способи вимірювання температури	9
<i>Лабораторна робота ТД- 2.</i> Вимірювання залежності питомої теплоємності від температури із допомогою калориметра з адіабатною оболонкою	20
<i>Лабораторна робота ТД- 3.</i> Вивчення ізохорного процесу	28
<i>Лабораторна робота ТД- 4.</i> Вивчення залежності температури кипіння води від зовнішнього тиску	33
<i>Лабораторна робота ТД- 5.</i> Дослідження термодинамічного циклу парокомпресорної холодильної машини	46
РОЗДІЛ II. Дослідження процесів теплообміну та теплофізичних властивостей речовини (теплопередача)	46
<i>Лабораторна робота ТП- 1</i> Вимірювання коефіцієнта теплопровідності твердих тіл методом плоского шару	52
<i>Лабораторна робота ТП- 2</i> Визначення коефіцієнта тепловіддачі при вільній конвекції повітря	57
<i>Лабораторна робота ТП- 3</i> Дослідження тепловіддачі від вертикальної труби у умовах вільної конвекції	61
<i>Лабораторна робота ТП- 4</i> Дослідження променистого теплообміну	68

ДОДАТКИ

Додаток 1. Таблиця градування термопар хромель - копель	74
Додаток 2. Таблиця градування термопар хромель - алюмель	75
Додаток 3. Порядок визначення температури по величині термо – ЕРС.	76
Додаток 4. Вимірювання ЕРС із допомогою переносного потенціометра ПП-63	77
Додаток 5. Визначення опору із допомогою моста опору Р-333	78
Додаток 6. Значення констант C і n в рівнянні Міхєєва для вільної конвекції	80
Додаток 7 Теплофізичні властивості сухого повітря	80
Додаток 8 Теплофізичні властивості води	81
Додаток 9 Українсько-російський словничок термінів	82
ЗМІСТ	85

Навчальне видання

МАЛАФАЄВ Микола Тимофійович

ТОРЯНИК Олександр Іванович

ФОЩАН Андрій Леонтійович

ЧЕКАНОВ Микола Анатолійович

ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ТЕПЛОТЕХНІКИ

Навчальний посібник

В авторській редакції

Підп. до друку .07.11 р. Формат 60x84/16. Папір офсет. Друк. офс.
Обл.-вид. арк. 4,8 Умов. друк. арк. 5,4. Тираж 300 прим. Зам. № .

Видавець та виготовлювач
Харківський державний університет харчування та торгівлі
вул. Ключківська, 333, Харків, 61051
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК №2319 від 19.10.2005 р.