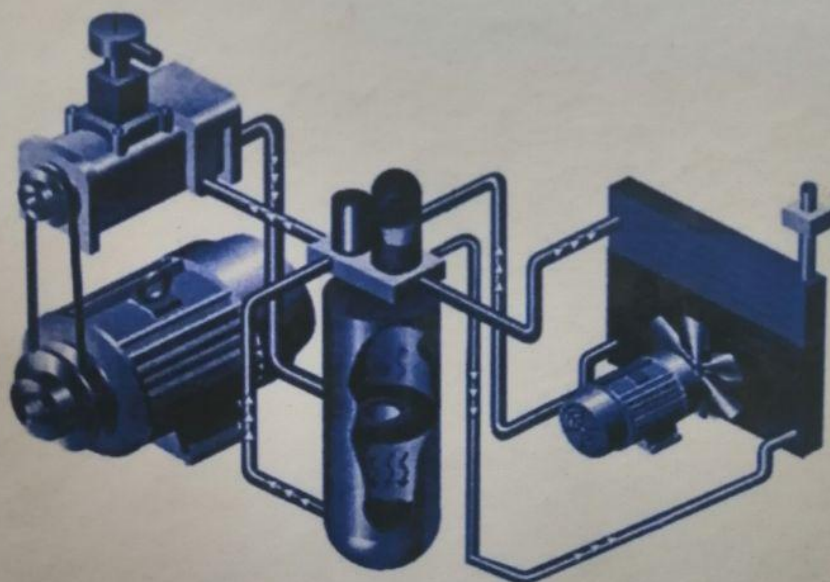


Гетта В.Г.

Теплотехніка і теплові машини



Чернігів – 2016

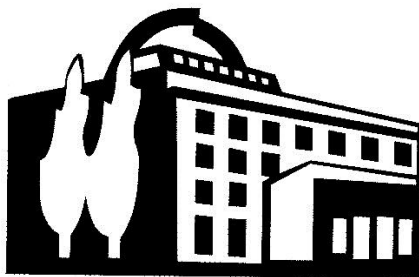
**Чернігівський
національний педагогічний університет
імені Т.Г. Шевченка**

ГЕТТА В.Г.

ТЕПЛОТЕХНІКА І ТЕПЛОВІ МАШИНИ

ЛАБАРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано вченою радою
Чернігівського національного педагогічного
університету імені Т.Г. Шевченка
як навчальний посібник для студентів
технологічних факультетів*



Чернігів – 2016

УДК 621.1 (076.5)
ББК 33я73
Г44

Рецензенти:

О. М. Торубара – доктор пед. наук, професор,
декан технологічного факультету
Чернігівського національного
педагогічного університету імені Т. Г. Шевченка;

М. А. Пригодій – доктор пед. наук, професор кафедри педагогіки
Національного університету біоресурсів і
природокористування;

В. І. Коваль – кандидат технічних наук, доцент
Чернігівського національного
технологічного університету

Гетта В. Г.

Г 44 **Теплотехніка і теплові машини:** [лабораторний практикум] /
В. Г. Гетта. – Чернігів : ЧНПУ імені Т.Г. Шевченка, 2016. –163 с.

УДК 621.1 (076.5)
ББК 33я73

Навчальний посібник (лабораторний практикум) підготовлений у відповідності з програмою для студентів технологічних факультетів педагогічних університетів.

Складається з трьох розділів. В першому – викладені основні положення термодинаміки. В другому розділі надруковані матеріали (інструкції) з виконанням лабораторних робіт. В третьому розділі викладені матеріали з виконанням лабораторних робіт за вибором. Завершується лабораторний практикум додатками.

Рекомендовано до друку вченою радою
Чернігівського національного педагогічного університету
імені Т.Г. Шевченка
(протокол № ... від 2016 р.)

© В. Г. Гетта, 2016

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	5
------------------	----------

РОЗДІЛ 1	
ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ	17

1.1. Основні поняття термодинаміки	8
1.2. Перший закон (начало) термодинаміки	19
1.3. Цикл Карно	20
1.4. Вільна енергія	21
1.5. Ентропія	21
1.6. Другий закон (начало) термодинаміки	22
1.7. Третій закон (начало) термодинаміки	24
1.8. Цикл двигунів внутрішнього згоряння	25
1.9. Тепло і масообмін:	
- теплопровідність	28
- конвективний теплообмін	29
- променевий теплообмін	29
- масообмін	32

РОЗДІЛ 2	
ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ	34

<i>Лабораторна робота № 1</i>	
Методи вимірювання температури	35
<i>Лабораторна робота № 2</i>	
Градуювання термоелектричного датчика температури	55
<i>Лабораторна робота № 3</i>	
Тарування електричного термометра опору	63
<i>Лабораторна робота № 4</i>	
Вивчення теплопровідності багатошарової плоскої стінки	71
<i>Лабораторна робота №5.</i>	
Визначення коефіцієнта тепловіддачі при вільному і вимушеному русі повітря в горизонтальній трубі	76
<i>Лабораторна робота №6</i>	
Дослідження параметрів водяної пари за допомогою діаграми та таблиць	84
<i>Лабораторна робота №7</i>	
Дослідження процесу теплопередачі в теплообміннику	95
<i>Лабораторна робота №8</i>	
Дослідження роботи поршневого компресора	105
<i>Лабораторна робота №9</i>	
Дослідження холодильної установки компресорного типу	113

РОЗДІЛ 3	
ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ЗА ВИБОРОМ	123
<i>Лабораторна робота № 1</i>	
Визначення параметрів вимірювальних приладів.....	124
<i>Лабораторна робота № 2</i>	
Визначення теплосмності газів.....	138
<i>Лабораторна робота №3</i>	
Визначення технічних характеристик твердого палива.....	143
ЛІТЕРАТУРА	159
ДОДАТКИ	161



Передмова

Підготовка підростаючого покоління до життя і праці покладено на сучасну школу, вчителів. Значний вклад у цю справу вносять вчителі технологій. Саме вони в процесі трудового навчання, відповідно до вікових можливостей, у поєднанні теорії з практикою, повсякденним життям формують в учнів важливі риси особистості, ставлення до навколишньої дійсності, розуміння явищ природи. Проте успішне формування цих якостей в учнів у значній мірі залежить від підготовленості самих вчителів, їх креативності, ерудованості, вміння інпретувати закони науки, формулювати таким чином світогляд школярів. Цілісне бачення оточуючої дійсності в студентів, майбутніх вчителів технологій, формується переважно при вивченні загально технічних дисциплін, серед яких важливе місце займає курс «Теплотехніка і теплові машини». Це обумовлено, по-перше, тим, що процеси отримання, передачі та використання теплоти мають місце в усіх галузях техніки сучасного виробництва. По-друге, теплові явища проявляються не тільки в техніці, а й у природі, повсякденно супроводжують наше життя. По-третє, теплові явища і процеси мають місце у побуті, їх знання сприяє грамотній експлуатації побутової техніки, економії енергії, що в даний час є дуже важливо.

Теоретичні питання теплотехніки автором викладені в навчальному посібнику «Теплотехніка і теплові машини», виданому в 2015 році. Проте в ньому відсутня інформація про лабораторні роботи. Багаторічний досвід викладання свідчить, що лабораторний практикум повинен бути окремим виданням. Ним зручно користуватись як при підготовці до занять, так і під час виконання лабораторних робіт. Крім того, на думку автора лабораторний практикум, як окремий вид занять, повинен бути спрямований на більш

глибоке засвоєння теоретичних знань з тієї чи іншої теми теоретичного курсу, залучення студентів до самостійної роботи, формування дослідницьких умінь і навичок та виховання творчих рис особистості.

Виходячи із зазначеного вище даний навчальний посібник має три розділи. В першому – йдеться про основні положення і закони термодинаміки, тобто дається коротка інформація про термінологію термодинаміки її закони, цикли двигунів тощо. В другому розділі викладені інструкції до виконання програмних лабораторних робіт з відповідними матеріалами для самостійної роботи. В третьому – пропонуються лабораторні роботи за вибором.

Завершується посібник додатками, в яких міститься інформація необхідна для виконання лабораторних робіт.

Зміст інструкцій до лабораторних робіт спрямований на поглиблення знань про теплові явища, формування умінь використовувати знання на практиці, розвиток технічного мислення, формування дослідницьких умінь. Значна увага в посібнику приділена формуванню технічного мислення – розвитку умінь порівнювати і протиставити, аналізувати, узагальнювати і робити висновки.

Автор щиро вдячний рецензентам та тим хто сприяв підготовці та виданню даного посібника.



ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕРМОДИНАМІКИ

РОЗДІЛ І

- 1.1. Основні поняття термодинаміки
- 1.2. Перший закон (начало) термодинаміки
- 1.3. Цикл Карно
- 1.4. Вільна енергія
- 1.5. Енергія
- 1.6. Другий закон (начало) термодинаміки
- 1.7. Третій закон (начало) термодинаміки
- 1.8. Цикл двигунів внутрішнього згоряння
- 1.9. Тепло і масообмін:
 - теплопровідність
 - конвективний теплообмін
 - променевий теплообмін
 - масообмін

1.1 Основні поняття термодинаміки

Наука, що вивчає загальні властивості речовини, зв'язані з тепловим рухом в умовах рівноваги, називається *термодинамікою*.

Термодинаміка має справу з макроскопічними характеристиками об'єктів, що вивчаються, базуючись на декількох експериментально встановлених положеннях – *законах (початках) термодинаміки*.

Термодинамічною системою називається сукупність макроскопічних об'єктів (тіл і полів), які обмінюються енергією в формі роботи і в формі тепла як один з другим, так і із зовнішнім середовищем. *Енергією* називається єдина міра різних форм руху. Енергія – скалярна величина. Для кількісної характеристики якісно різних форм вводять відповідні їм види енергії: *механічна, внутрішня, електромагнітна, хімічна, ядерна тощо*. Механічною енергією називається енергія механічного руху і взаємодія тіл. Вона дорівнює сумі кінетичної і потенціальної енергії.

Внутрішньою енергією називається енергія системи, яка залежить тільки від її термодинамічного стану. Внутрішня енергія системи дорівнює сумі:

- а) кінетичної енергії хаотичного руху мікрочастинок системи (молекул, атомів, іонів, вільних електронів тощо);
- б) потенціальної енергії взаємодії цих частинок;
- в) енергії взаємодії атомів або іонів в молекулах;
- г) енергії електронних оболонок атомів і іонів;
- д) ядерної енергії;
- є) енергії електромагнітного випромінювання.

Електромагнітна енергія – це сума енергії електричного і магнітного полів.

Ядерна енергія – це енергія зв'язку нуклонів у ядрах атомів.

Необхідною умовою виконання системою роботи є переміщення взаємодіючих з нею зовнішніх тіл, тобто зміна зовнішніх параметрів стану системи. Роботою розширення називається робота, яка виконується системою

проти сил зовнішнього тиску. Робота рівноважного розширення системи від об'єму V_1 до V_2 дорівнює $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$.

Термодинамічна система називається *замкнутою* або *ізолюваною*, якщо відсутній будь-який обмін енергією між нею і зовнішнім середовищем.

Гомогенною називається термодинамічна система, всередині якої немає поверхонь розділу, які відокремлюють макроскопічні частини системи, що різняться за властивостями і складом. Термодинамічна система, яка не задовольняє цим умовам називається *гетерогенною*. Гетерогенна система, наприклад, є суміші газів, рідкі тверді розчини, а також всі хімічно однорідні тіла. Прикладом гетерогенної системи є, наприклад, лід який плавиться в середовищі води.

Фазою називається сукупність всіх гомогенних частин термодинамічної системи, які у відсутності зовнішньої силової дії є фізично однорідними. Наприклад, волога пара складається із двох фаз – киплячої рідини і сухої насиченої пари.

Стан термодинамічної системи визначається сукупністю *параметрів* – всіх фізичних величин, що характеризують макроскопічний стан системи.

Основними параметрами стану системи є – *тиск, температура і питомий (або молярний) об'єм*.

Тиск P – фізична величина, що дорівнює відношенню сили, яка рівномірно розподілена на поверхні тіла до її площі:

$$P = \frac{F}{S} \text{ Н/м}^2,$$

де F – сила, Н ; S – площа поверхні, м^2 .

Розрізняють тиски: атмосферний (барометричний), надлишковий (манометричний), абсолютний та розрідження (вакуум).

Тиск, створений атмосферним повітрям називають барометричним за назвою приладу, що його вимірює, або атмосферним. Атмосферний тиск – величина змінна, тому в техніці використовують нормальний атмосферний тиск

$$P_a = 0,10132 \text{ МПа} = 760 \text{ мм рт.ст.}$$

Тиск більший за атмосферний, називають надлишковий або манометричний за приладом, яким його вимірюють.

Абсолютний тиск – тиск відрахований від нуля. Між абсолютним, барометричним і надлишковим тиском є така залежність:

$$P_a = P_b + P_n$$

Розрідження, коли величина тиску менше від атмосферного, вимірюється вакуумметром. Співвідношення між абсолютним, барометричним тиском і розрідженням таке:

$$P_a = P_b - P_v$$

Величина тиску рідинного манометра (Па) визначається так

$$P = (\rho_p - \rho_n)gh,$$

де ρ_p – густина рідини, якою заповнений манометр, і ρ_n – густина повітря, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с²;

h – показ рідинного манометра (висота або різниця висот стовпчиків рідини), м.

Враховуючи, що $\rho_p \gg \rho_n$, значення тиску можна визначити за формулою

$$P = \rho_p \cdot g \cdot h.$$

Вимірюючи тиск рідинним манометром необхідно пам'ятати, що покази манометра залежать не тільки від тиску середовища, що вимірюється, але і від температури ртуті. Зі зростанням температури від 0°C і вище її густина зменшується, а значить покази приладу будуть вищі, ніж при тому ж тиску і температурі 0°C. Залежність тиску ртутного манометра (барометра) від температури має вигляд:

$$P_0 = P_t(1 - 0,00127^\circ t) .$$

Температура – міра нагрітості тіла, або за молекулярно-кінетичною теорією – це середня кінетична енергія руху елементарних частинок:

$$T = \frac{3}{2k} \cdot \frac{mv^2}{2}$$

де $k=1,3806 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – стала Больцмана, тобто міра інтенсивності теплового руху молекул.

Отже, температура зв'язана з середньою кінетичною енергією частинок тіла, що перебувають в хаотичному русі. Вона до певної міри є умовною величиною, яка тільки відображає ті кінетичні процеси, що відбуваються в речовині. Числа, що виражають значення температури, теж цілком умовні, як умовні і одиниці температури – градуси. Щодо початку відліку чисел, що виражають температуру, то він теж умовний. Можна звичайно починати відлік температури від її природної границі – від того теплового стану, в якому безладний рух молекул – не відбувається і в якому кінетична енергія цих рухів дорівнює нулю. Проте можна відлічувати температуру і від якогось умовного нуля. Такими реперними точками можуть бути, наприклад, температури плавлення або кипіння чистих речовин при заданих зовнішніх умовах (тисках). Наприклад, замерзання і кипіння дистильованої води. З історії (XVII століття) відомо, що на перших термометрах температури такого льоду позначали числом 100, а кипіння води – цифрою 0.

Для побудови температурної шкали, без недоліків, треба, очевидно, знайти таку температурну величину, яка не залежить від термометричного тіла. Таку величину в 1848 році дав Кельвін і на її основі встановив так звану термодинамічну шкалу температур. Шкалу Кельвіна можна відтворити, якщо термометричною речовиною взяти ідеальний газ, а як термометричну величину – об'єм певної маси ідеального газу при сталому тиску або його тиск при сталому об'ємі. Як тиск, так і об'єм газу залежить виключно від температури. Відомо також, що ідеальні гази відзначаються тим, що їх температурний коефіцієнт розширення і температурний коефіцієнт зміни тиску, віднесені до початкових значень температури і тиску, є сталі і дорівнюють близько $1/273$ (якщо користуватися градусами Цельсія). Крім того властивості всіх ідеальних газів однакові, тому ідеальні гази – найкращі

термометричні речовини: їх термометричні властивості не залежать від конкретної речовини і градуси однакові по всій шкалі. Саме тому за міжнародною угодою (1887 р.) як стандартну прийняли температурну шкалу газового (водноевго) термометра сталого об'єму (водень близький до ідеального газу). При цьому за реперні точки взято температури танення льоду і водяної пари киплячої дистильованої води при нормальному атмосферному тиску. Реперним точкам приписують значення 0 і 100°.

Далі цю шкалу поширили (в 1927, 1948 і 1960рр.) за межі області 0–100°С і вибрали додаткові реперні точки. Наприклад, точка кипіння кисню – 182,970°С, точка тверднення срібла 960,8°С, золота – 1063,0°С.

Таким чином, за основу взято газовий термометр. Всі інші термометри (наприклад, ртутний) градуують, порівнюючи їх покази з показами газового термометра.

На температурних шкалах Цельсія, Реомюра і Фаренгейта. Які тепер використовуються, реперними точками є температури танення льоду і кипіння води. Але цей температурний інтервал у трьох шкалах поділено відповідно на 100, 80 і 180 частин. А реперні точки в шкалах Цельсія (°С), Реомюра (°R), і Фаренгейта (°F) позначені відповідно цифрами 0 і 100; 0 і 80; 32 і 212. Перехід від однієї шкали до іншої легко здійснити за формулою:

$$n^{\circ}C = 0,8n^{\circ}R = (1,8n + 32)^{\circ}F.$$

Рідинні температури, які широко використовуються у техніці і в побуті, не відзначаються точністю. Застосування їх обмежене з боку низьких температур властивостями рідини, а з боку високих – властивостями скла: при низьких температурах рідина замерзає, а при високих скло розм'якшується і розплавляється. Проте рідинні термометри можна застосовувати в досить широкій області температур від 200 до 600°С.

У рідинних термометрах використовується переважно такі речовини

Пентан – область температур від – 200 до 20°С.

Етиловий спирт – від – 110 до 50°С.

Толуол – від – 70 до 100°С.

Ртуть – від – 38,87 до 600°C.

Більш повна інформація про термометри і методи вимірювання температури буде викладена в лабораторній роботі №1.

Як уже відзначалося крім тиску і температури третім параметром стану термодинамічної системи є *питомий об'єм речовини* (V) – це об'єм який займає одиниця маси речовини

$$V = \frac{V}{m} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Величину, обернену до питомого об'єму, називають густиною:

$$\rho = \frac{1}{V} = \frac{m}{V} \text{ кг/м}^3.$$

Згідно з висновком закону Авагадро, об'єм одного моля в нормальних умовах ($P=101,325 \text{ кПа}$ і $t=0^\circ\text{C}$) дорівнює $22,4 \text{ м}^3/\text{моль}$, тобто $\mu V=22,4 \text{ м}^3/\text{моль}$

$$V = \frac{22,4}{\mu} \text{ м}^3/\text{кг}$$

де μ – молекулярна маса газу, кг/кмоль.

Між основними термодинамічними параметрами ідеального газу існує залежність, яка описується рівнянням Клапейрона – Менделєєва:

для 1 кг газу – $PV=RT$ або $P=\rho RT$,

для m кг газу $PV=mRT$.

Основні закони ідеального газу

а) *закон Бойля-Маріотта*: при постійних температурі й масі добуток числових значень тиску і об'єму газу є постійною величиною:

$$PV = \text{const}.$$

б) *закон Гей-Люссака*: при постійному тиску об'єм даної маси газу прямо пропорційний його абсолютній температурі:

$$V = \alpha V_0 T = V_0 \frac{T}{T_0},$$

де V_0 – об'єм газу при температурі $T_0 = 273,15^\circ\text{K}$,

$\alpha = \frac{1}{T_0}$ – коефіцієнт об'ємного розширення.

в) закон Шарля: при постійному об'ємі тиск даної маси газу прямо пропорційний його абсолютній температурі:

$$P = P_0 \frac{T}{T_0},$$

де P_0 – тиск газу при температурі $T_0 = 273,15^\circ\text{K}$.

г) закон Авагадро: при однакових тиску і температурі в рівних об'ємах різних ідеальних газів налічується однакове число молекул; або теж саме: при однакових тисках і температурах грам-моль різних ідеальних газів займає однаковий об'єм.

д) рівняння стану ідеального газу має такий вигляд

$$PV_\mu = RT,$$

де P , V_μ і T – тиск, молярний об'єм і абсолютна температура газу, а R – універсальна газова постійна, чисельно рівна роботі, яка виконується 1 молем ідеального газу при ізобарному нагріві на один градус:

$$\begin{aligned} R &= 8,31 \cdot 10^8 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{град}} = 0,0821 \frac{\text{л} \cdot \text{атм}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = 0,848 \frac{\text{кГм}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = \\ &= 8,31 \cdot 10^7 \frac{\text{ерг}}{\text{моль} \cdot \text{град}} = 1,987 \frac{\text{кал}}{\text{моль} \cdot \text{град}} \end{aligned}$$

Для довільної маси M газу об'єм $V = \frac{M}{\mu} V_\mu$ рівняння стану записується так:

$$PV = \frac{M}{\mu} RT.$$

Це рівняння називається рівнянням Менделєєва-Клапейрона.

З рівняння Менделєєва-Клапейрона витікає, що число n_0 молекул, яке міститься в одиниці об'єму ідеального газу, дорівнює

$$n_0 = \frac{N_A}{V_\mu} = \frac{PN_A}{RT} = \frac{P}{kT},$$

де $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{град}} = 1,38 \cdot 10^{-18} \text{ерг/град}$ – постійна

Больцмана, а N_A – число Авагадро ($N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{моль}^{-1} = 6,023 \cdot 10^{26} \text{кмоль}^{-1}$).

Зведена таблиця залежностей в ідеальному газі

Назва процесу	Рівняння процесу	Зв'язок між параметрами стану	Робота в процесі	Тепло, надане в процесі
Ізохорний	$V = \text{const}$	$\frac{P}{T} = \text{const}$	$\delta A = 0$ $A = 0$	$\delta Q = C_V dT$ $Q = C_V(T_2 - T_1)$
Ізобарний	$p = \text{const}$	$\frac{V}{T} = \text{const}$	$\delta A = p dV$ $A = p(V_2 - V_1)$	$\delta Q = C_p dT$ $Q = C_p(T_2 - T_1)$
Ізотермічний	$T = \text{const}$	$pV = \text{const}$	$\delta A = p dV$ $A = \frac{M}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} =$ $= \frac{M}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}$	$\delta Q = \delta A$ $Q = A$
Адіабатичний	$\delta Q = 0$	$pV^x = \text{const}$ $pT^{\frac{x}{1-x}} = \text{const}$ $VT^{\frac{1}{x-1}} = \text{const}$	$\delta A = p dV = -dU$ $A = -\Delta U = C_V(T_1 - T_2) =$ $= \frac{1}{x-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2)$ $A = \frac{M}{\mu} \frac{RT_1}{x-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{x-1}{x}} \right] =$ $= \frac{p_1 V_1}{x-1} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1-x} \right]$	$\delta Q = 0$ $Q = 0$
Політропний	$C = \text{const}$	$pV^n = \text{const}$ $pT^{\frac{n}{1-n}} = \text{const}$ $VT^{\frac{1}{n-1}} = \text{const}$	$\delta A = p dV$ $A = \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2)$ $A = \frac{M}{\mu} \frac{RT_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right] =$ $= \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{1-n} \right]$	$\delta Q = C dT$ $Q = C(T_2 - T_1)$
Ізобарний	$dU = C_V dT$ $\Delta U = C_V(T_2 - T_1)$	$dH = dU + p dV = \delta Q$ $\Delta H = \Delta U + A = Q$	$C_p = \frac{M}{\mu} \frac{xR}{x-1}$	$n = 0$

Ізотермічний	$dU=0$ $\Delta U=0$	$dU=0$ $\Delta U=0$	$C_T = \begin{cases} +\infty n p u dV > 0 \\ -\infty dV n p u < 0 \end{cases}$	$n=1$
Адіабатичний	$dU=C_V dT = -\delta A$ $\Delta U = -A = C_V(T_2 - T_1)$	$dH = C_p dT = -x \delta A$ $\Delta H = -xA = C_p(T_2 - T_1)$	$C_p = 0$	$n = d = \frac{C_p}{C_V}$
Політропний	$dU=C_V dT$ $\Delta U=C_V(T_2 - T_1)$	$dH=C_p dT$ $\Delta H= C_p(T_2 - T_1)$	$C = \frac{M}{\mu} \frac{R(n-x)}{(x-1)(n-1)}$	$n = \frac{C-C_p}{C-C_V}$

Кінетична теорія газів добре пояснює багато явищ в ідеальних газах, в яких рухи молекул через незначні сили взаємодії між ними можна вважати вільними. В тих випадках, коли силами взаємодії знехтувати не можна, як наприклад, у реальних газах, теорія значно менш точно описує явища, які відбуваються в них. Це пояснюється тим, що в більшості випадків детальна картина молекулярних рухів невідома, бо неможливо врахувати досить точно всі сили, які діють на молекули. Адже кожна молекулярна система складається з великої кількості частинок, які взаємодіють між собою, безперервно рухаються і змінюють своє взаємне розташування. За таких умов точно знати сили, які діють на молекули в будь-який проміжок часу, а отже, і їх рухи, неможливо. Не можна через це теоретично визначити і зв'язок між молекулярними рухами і властивостями речовини.

Проте ряд властивостей речовини, багато явищ в ній, можна вивчити і без детального знання механізму молекулярних рухів, якщо користуватися тільки макроскопічними величинами, тобто величинами, які характеризують речовину в цілому, але не мають змісту в застосуванні до окремих частинок. До таких величин належить *насамперед тиск і температура*.

При вивченні властивостей речовини, які зв'язані з тепловими рухами частинок, також користуються деякими загальними законами, справедливими завжди, незалежно від характеру руху молекул, взаємодії між ними, структури речовини. Ці загальні закони стосуються енергії, її зміни і зв'язаних з нею величин. Наука, що вивчає загальні властивості речовини, зв'язані з тепловим рухом в умовах рівноваги, називається *термодинамікою*.

Особливе положення термодинаміки у науці зв'язане з тим, що будь-яка форма енергії при її перетвореннях кінець кінцем переходить в енергію теплових рухів. Якщо, наприклад, у процесі механічного руху енергія тіла або системи тіл зменшується від дії сил тертя, то це відбувається тому що вона переходить у тепло – тіла які труться, нагріваються. В тепло переходить і енергія електричного струму, енергія світла, енергія хімічних реакцій і т. д. Будь-який вид енергії у процесі перетворень може пройти через багато форм енергії, але кінцевим результатом всіх таких перетворень обов'язково буде тепла енергія.

Найбільший інтерес має перетворення механічної енергії у теплову і зворотний процес утворення механічної роботи за рахунок теплової енергії.

Важливим поняттям термодинаміки є *рівновага системи*. Система перебуває в *термодинамічній рівновазі*, якщо макроскопічні величини, які визначають її стан, залишаються сталими. В першу чергу це стосується тиску і температури. Проте частинки, з яких складається система (атоми, молекули), не припиняють своїх складних рухів. Тому поняття про рівновагу є певною ідеалізацією, бо строго кажучи, параметри стану при термодинамічній рівновазі не лишаються сталими, а зазнають певних коливань поблизу своїх рівноважених (середніх) значень. Такі коливання називаються *флуктуаціями*. Крім того, про термодинамічну рівновагу можна говорити, тільки тоді, коли кількість частинок, що утворюють систему, дуже велика.

Якщо система з якихось причин не перебуває в стані рівноваги або виведена з нього і після цього полишена на саму себе (тобто не зазнає

зовнішнього впливу), то як показує досвід, сам собою відбувається перехід до стану рівноваги. Можна навіть сказати, що стан рівноваги – це є такий стан, в який переходить всяка молекулярна система при відсутності зовнішнього впливу на неї. Процес переходу до рівноваги називається *релаксацією*, а час, потрібний для цього, називається *часом релаксації*. Але коли вже рівновага встановлюється, то система не може самостійно повернутися до початкового не рівноважного стану. Інакше кажучи, зміни стану, яких зазнала система, переходячи до стану рівноваги, не можуть відбуватися у зворотному напрямі без зовнішнього впливу. Так, наприклад, якщо два тіла, що стикаються, мали спочатку різні температури і були полишені на самих себе, то кінець кінцем температури обох тіл вирівнюються. Але зворотній процес – збільшення різниці температур між ними – без зовнішнього впливу не відбувається. Отже, важливою особливістю молекулярних систем є їх необоротність. До необоротних процесів належить і розширення газів в порожнечу, не зрівноважене зовнішніми силами. Необоротними є всі явища перенесення: теплопровідність, дифузія і внутрішнє тертя.

Процеси, в ході яких система увесь час залишається в стані рівноваги, називається *квазістатичними*. Такі процеси, оскільки всі проміжні стани рівноважні, є оборотними.

Необоротний процес теплопровідності сам по собі не супроводиться виконанням роботи, бо під час цього процесу немає ніякого переміщення тіл. Отже, звичайний обмін теплотою двох статичних тіл з різними температурами не може привести до виконання роботи. *Потрібне третє проміжне тіло, яке прийняло б на себе тепло від більш нагрітого тіла, переміщуючись при цьому, і передавало б його менш нагрітому і саме воно, це проміжне тіло, повинно "по дорозі" виконувати механічну роботу.* Його називають *робочим тілом*. Більш нагріте тіло називають *нагрівником*, а холодне тіло, якому передається тепло, має назву *холодильник*.

Все сказане стосується реально існуючих установок для перетворення тепла в механічну роботу (парові машини, турбіни, двигуни внутрішнього згоряння та інші), які діють, як відомо, циклічно. Робоче тіло зазнає кругового процесу. Сукупність змін стану тіла, у результаті яких він (стан) відновлюється, називається *циклом*.

Відповідно до принципу В. Томсона, який був ним сформульований у минулому столітті, – *неможливо здійснити циклічний процес, єдиним результатом якого-небудь тіла, без того, щоб відбувалися якісь зміни в навколишніх тілах*. Цей принцип практично є своєрідним формулюванням першого начала термодинаміки.

1.2 Перший закон (начало) термодинаміки

Першим законом, що зв'язує механічну і теплову енергії, є закон збереження енергії. Його називають *першим началом термодинаміки*.

Дійсно, якщо стан системи зміниться внаслідок підведення до неї деякої кількості тепла dQ і при цій зміні стану система виконує роботу dA , то закон збереження енергії говорить: *кількість підведеного тепла дорівнює сумі виконаної роботи і зміни внутрішньої енергії системи*.

Математично він записується так:

$$dQ = dU + dA.$$

Оскільки $dA = pdV$, то

$$dQ = dU + pdV.$$

З математичного виразу закону видно, що

$$dA = dQ - dU,$$

тому перший закон термодинаміки можна сформулювати ще й так: *робота, яку виконує система, дорівнює різниці між кількістю теплоти, яку надано системі, і зміною її внутрішньої енергії*.

Робота, яку виконує один моль ідеального газу при його ізотермічному розширенні від об'єму V_1 до об'єму V_2 дорівнює:

$$A = RT \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

При адіабатичному розширенні, якщо температура спадає від T_1 до T_2 робота (віднесена до 1 моля), яку виконує газ, дорівнює

$$A = \frac{R(T_1 - T_2)}{\gamma - 1},$$

де $\gamma = \frac{C_P}{C_U}$.

1.3 Цикл Карно

Для виконання роботи робоче тіло, виконавши певні процеси, при яких через нього від нагрівника до холодильника була передана деяка кількість тепла, повертається в початковий стан, щоб знову почати весь процес. Інакше кажучи, робоче тіло зазнає *кругового процесу*.

Французький вчений Карно розглянув круговий процес і з'ясував умови його здійснення, при яких буде виконана максимальна робота.

У результаті кругового процесу Карно деяка кількість тепла передається через робоче тіло від нагрівника до холодильника. Під час процесу робоче тіло здійснює крім того, певну роботу. В свою чергу над робочим тілом здійснюють роботу зовнішні сили. Позитивна робота, яку виконує тіло при його розширенні, більша, ніж негативна робота, яка виконується над ним при його стисканні і що частина тепла, здобута від нагрівника, перетворюється в механічну роботу.

Коефіцієнт корисної дії в циклі Карно визначається за рівністю

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2},$$

де Q_2 – кількість тепла, яке робоче тіло отримало від нагрівника;

Q_1 – кількість тепла, яке робоче тіло віддало холодильнику.

Якщо цикл Карно провести в зворотному напрямі, то робоче тіло, яке бере участь у процесі, пройде через ті самі стани, але в зворотному порядку.

При цьому не від нагрівника до холодильника, а навпаки – від холодильника до нагрівника. Так працює *холодильна* машина.

1.4 Вільна енергія

Внутрішню енергію системи не завжди і не повністю можна використати для перетворення в механічну роботу. Та частина енергії системи, яку в даних умовах можна використати для перетворення в механічну роботу, називається *вільною енергією*.

Вільна енергія системи вимірюється роботою, яку може виконати система (наприклад, ідеальний газ), змінюючи свій стан ізотермічно і оборотно від стану, в якому вона перебуває до вибраного нами початкового стану, при якому вільну енергію вважають рівною нулю (початок відліку).

1.5 Ентропія

При здійсненні циклу Карно робоче тіло здійснювало перехід від одного стану (нагрівника) до іншого (холодильника). При цьому треба брати до уваги, що кількість тепла, яке треба надати тілу або відібрати від нього при переході від одного стану до іншого, не визначається однозначно початковим і кінцевим станами, а істотно залежить від способу здійснення цього переходу. Інакше кажучи, кількість тепла Q не є функцією стану тіла, як, наприклад, внутрішня енергія U (або вільна енергія). Це впливає з рівняння першого начала термодинаміки.

$$dQ = dU + dA,$$

бо робота dA тіла (або над тілом) залежить від того, як вона здійснюється, тоді як зміна внутрішньої енергії dU не залежить від того, як саме змінився стан.

Але якщо кількість тепла Q_2 , доставлена тілу від нагрівника при T_2 і Q_1 , яку тіло передало холодильнику при T_1 , не дорівнюють одна одній, то зведені теплоти чисельно рівні між собою

$$\left| \frac{Q_2}{T_2} \right| = \left| \frac{Q_1}{T_1} \right|$$

Ця особливість теплоти дає можливість ввести особливу термодинамічну величину – *ентропію*, яка має фундаментальне значення в термодинаміці. Вона є функцією стану, і тим значенням, яке вона має в усіх процесах у природі, зокрема в процесі перетворення теплоти в роботу.

Ентропією називається функція S стану системи, диференціал якої в елементарному оборотному процесі дорівнює відношенню нескінченно малої кількості теплоти, наданої системі, до абсолютної температури системи

$$dS = \frac{dQ}{T}, S = \int \frac{dQ}{T}.$$

Як показує досвід і теорія, для необоротних процесів у замкнених системах ентропія завжди зростає, і ця властивість теж притаманна ентропії, так саме, як енергії властиво зберігатись при будь-яких процесах у замкнених системах.

Саме тому, що енергія має властивість зберігатись у замкнутій системі, вона, не може бути функцією, що показує, в якому напрямі йдуть процеси в такій системі; адже при будь-якій зміні стану енергія на початку і в кінці процесу та сама і вона тому не дає можливості відрізнити один від одного початковий і кінцевий стан. А ентропія, яка в природних процесах завжди зростає, дає можливість робити висновок, який напрям процесу можливий і який ні, який стан є початковим і який кінцевим.

Зростання ентропії в будь-якому процесі триває не безмежно, а лише до певного максимального значення характерного для даної системи. Це максимальне значення ентропії відповідає стану рівноваги і після того, як його досягнуто будь-які зміни стану без зовнішнього впливу припиняються.

Це твердження є змістом другого начала термодинаміки.

1.6 Другий закон (начало) термодинаміки

Французький вчений Саді Карно в 1824 році вперше прийшов до висновку, в подальшому (1850 р) Клаузі і Кельвін (1852 р) підтвердили його,

що неможливо здійснити такий періодично діючий процес, єдиним наслідком якого було б повне перетворення в роботу теплоти отриманої від нагрівника. Це положення отримало назву – **другий закон (начало) термодинаміки**.

Є й інші формулювання цього закону. Вільям Томсон другий закон термодинаміки сформулював так: "Неможливий циклічний процес, єдиним результатом якого було б виконання роботи за рахунок охолодження теплового резервуара".

Аналогічне формулювання закону дав Планк: "Неможливо побудувати періодично діючу машину, єдиним результатом якої було б підняття вантажу за рахунок охолодження теплового резервуару".

Поширення набуло також таке формулювання: "Вічний двигун другого роду побудувати неможливо".

Другий закон термодинаміки встановлює, що необоротні процеси, а такими є практично всі теплові процеси і, в усякому разі, всі процеси, що проходять природно, відбуваються так, що ентропія системи тіл, які беруть участь у процесі, збільшується, прямує до максимального значення. Максимальне значення ентропії досягається тоді, коли система приходить у стан рівноваги.

Перехід до рівноважного стану є більш можливим порівняно з усіма іншими переходами. Тому і спостерігаються тільки ті зміни стану, при яких система переходить з менш імовірного до більш імовірного стану. Привертає увагу подібність поведінки обох величин – ентропії та імовірності: обидві вони зростають при переході до рівноваги. А тому природно пов'язати ентропію системи в тому чи іншому стані з імовірністю цього стану. Такий зв'язок відкрив Л. Больцман. Звідси й пішов вислів "теплова смерть".

Зростання ентропії при необоротному процесі означає, що енергія, яку має система, стає менш доступною для перетворення в механічну роботу. В стані рівноваги, коли ентропія досягла максимального значення, енергія системи зовсім не може бути перетворена в роботу.

1.7 Третій закон (початок) термодинаміки

Досліди показують, що із зниженням температури у всякій системі спостерігається тенденція до все більшого ступеня впорядкованості. Встановленню порядку в тілі при високій температурі заважає тепловий рух частинок, з яких воно складається.

Якби можна було охолодити тіло до абсолютного нуля, коли теплові рухи не можуть заважати встановленню порядку, то в системі встановлювався б максимально можливий порядок і цьому стану відповідала б мінімальна ентропія.

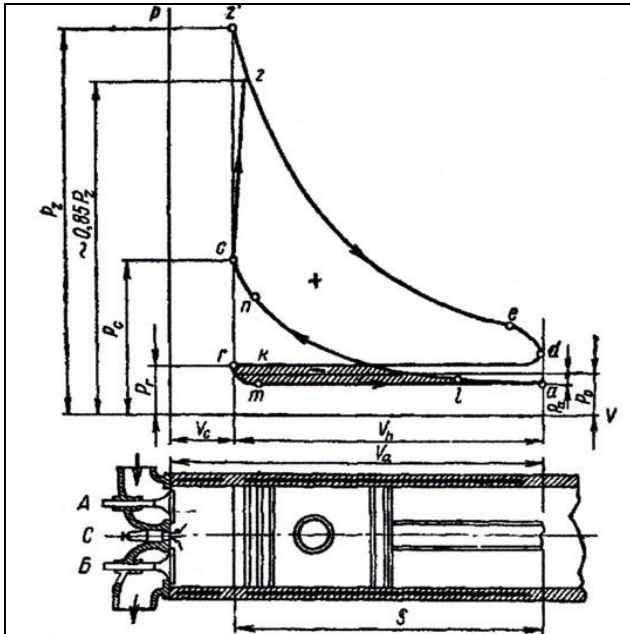
З багатьох дослідів, які проводились при низьких температурах, Нернст прийшов до такого висновку: *при абсолютному нулі температури будь-які зміни стану відбуваються без зміни ентропії.*

Це твердження називають теоремою Нернста, а також ***третім законом термодинаміки.***

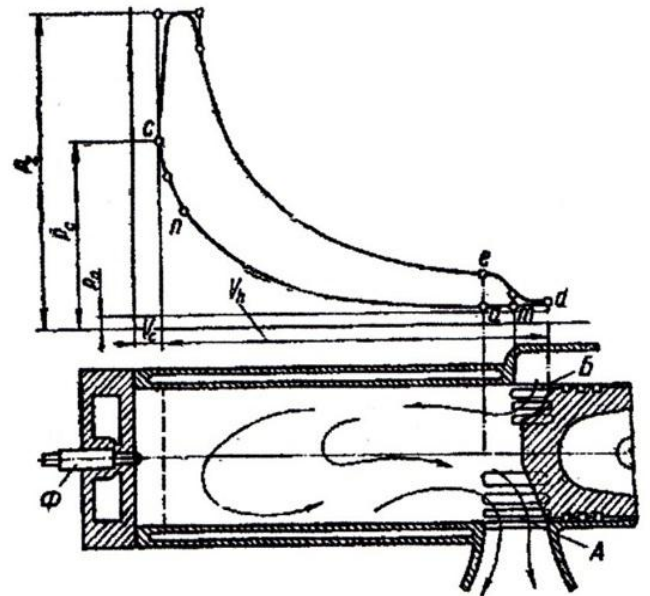
З того факту, що при $T=0$ і $S=0$, виходить, що абсолютний нуль температури принципово не можливий.

З третього закону термодинаміки випливають важливі висновки про поведінку речовини при дуже низьких температурах. Так, наприклад, з нього випливає висновок, що із зниженням температури теплоємність тіл повинна прямувати до нуля разом з температурою, а при абсолютному нулі вона повинна дорівнювати нулю. Дослід добре підтверджує цю тенденцію. Можна показати, що повинні прямувати до нуля (а при $T=0$) дорівнювати нулю коефіцієнт теплового розширення тіл, коефіцієнт стисливості і т. п.

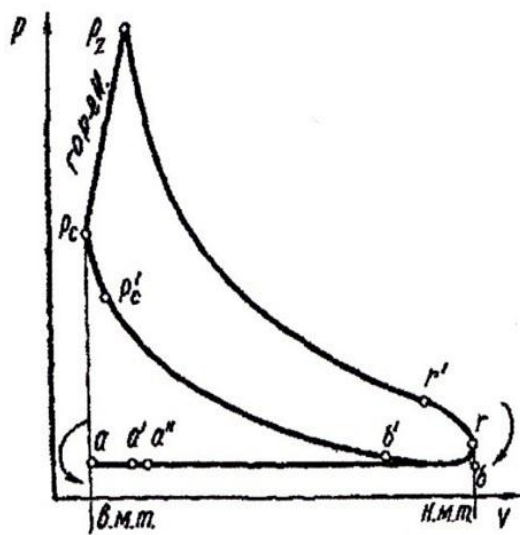
1.8 Цикли двигунів внутрішнього згорання



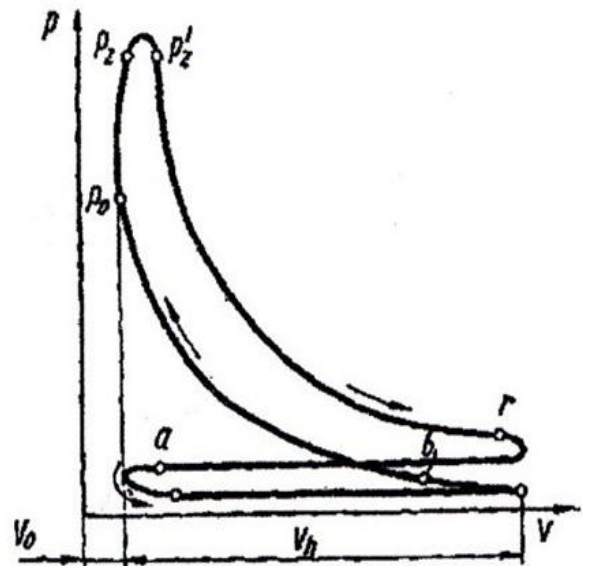
Циліндр і індикаторна діаграма чотирьохтактного двигуна
A – впускний клапан; *B* – випускний клапан;
C – свічка запалювання;



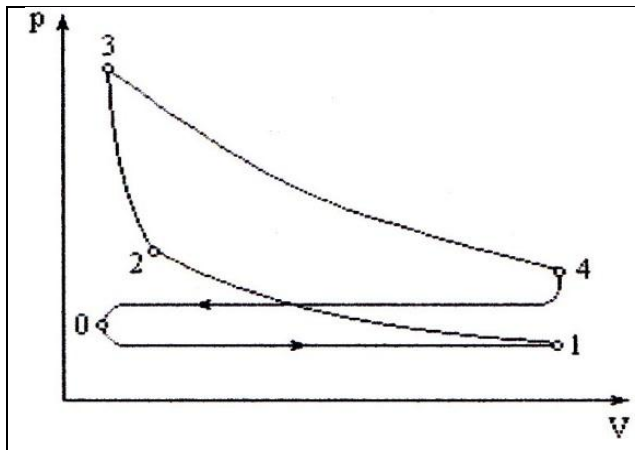
Циліндр і індикаторна діаграма двотактного двигуна з внутрішнім сумішоутворенням і займанням палива від стискування:
A – випускні вікна; *B* – продувальні вікна,
Phi – паливний клапан (форсунка)



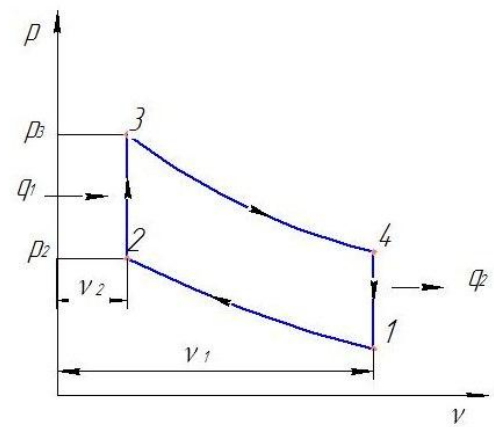
Процеси згорання і розширення в повній індикаторній діаграмі



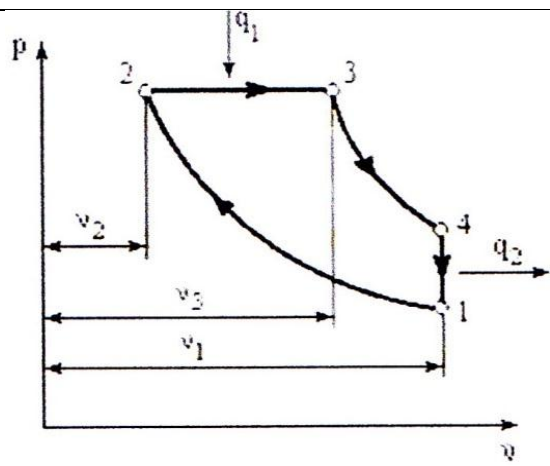
Згорання палива при змішаному циклі



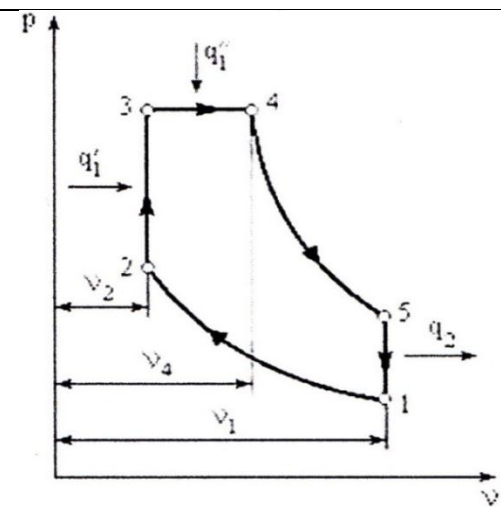
Індикаторна діаграма двигуна, що працює зі згорянням палива при постійному об'ємі



Ідеальний термодинамічний цикл ДВЗ з ізохорним підведенням теплоти.
Цикл в pV – координатах

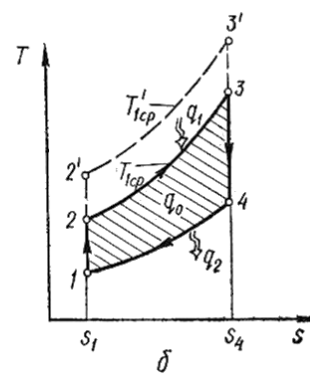
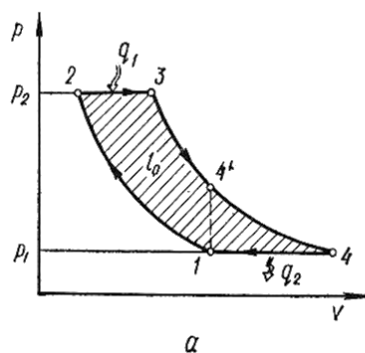


Ідеальний цикл двигуна з підведенням теплоти при постійному тиску в pV координатах



Ідеальний цикл двигуна із змішаним підведенням теплоти в pV – координатах

Цикл газових турбін



Цикл г. т. у. з підводом теплоти ($p = const$)
в $p - V$ (а) і $T - s$ – координатах (б)

Цикл реактивних двигунів

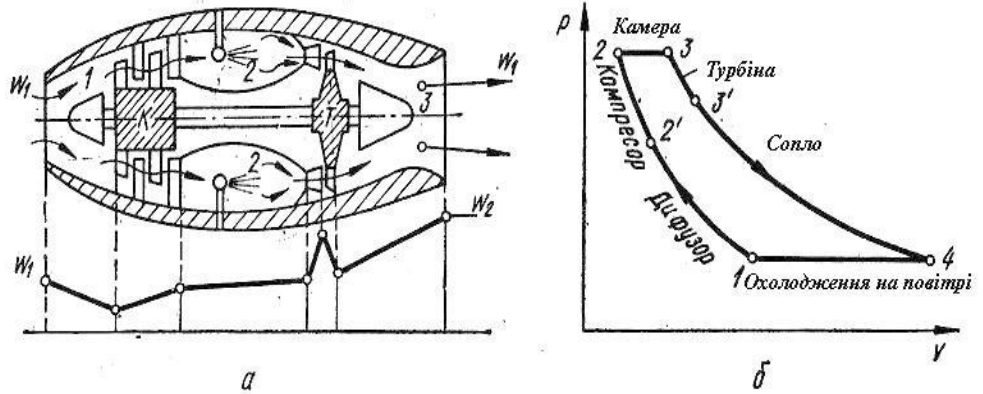
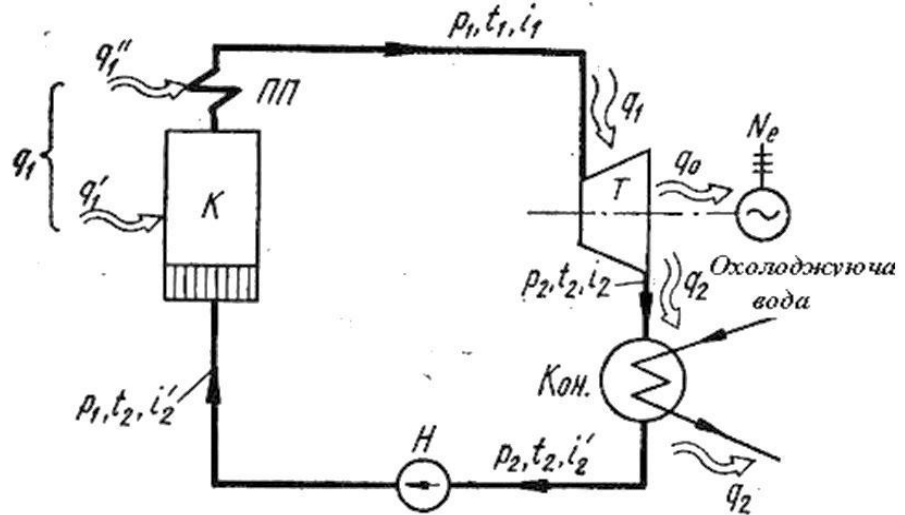
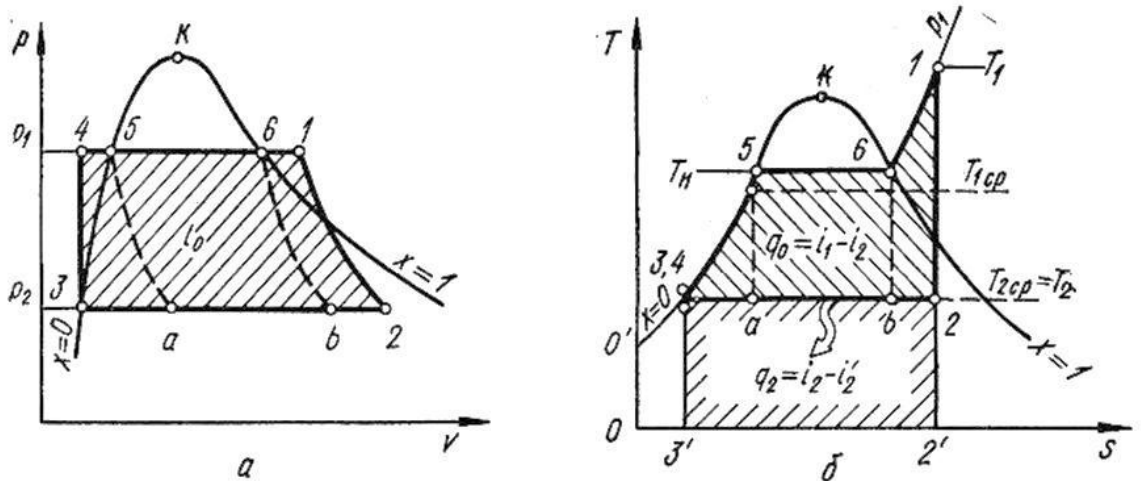


Схема (а) і цикл (б) турбокомпресивного повітряно-реактивного двигуна

Цикл паросилових установок



Принципова теплова схема паросилової установки



Основний цикл п. с. у. (цикл Ренкіна) в $p - V$ (а) і $T - s$ координатах (б).

1.9 Тепло і масообмін

1. Теплопровідність

Закон Фур'є

$$g = -\lambda \text{grad}T = -\lambda \frac{\partial T}{\partial n},$$

де λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м.К;

$\text{grad}T$ – вектор, який скерований у напрямку збільшення температури;

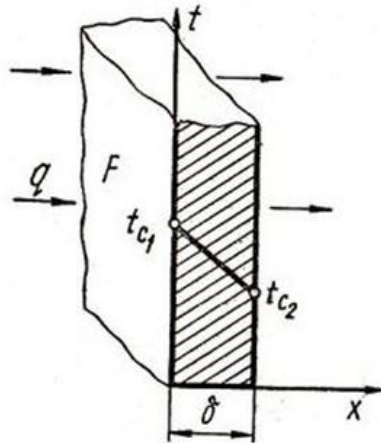
n – нормаль до ізотермічної поверхні.

$$\lambda = \lambda_0(1 + b \cdot (t - t_0)),$$

де λ_0 – значення коефіцієнта теплопровідності при температурі t_0 ;

b – коефіцієнт, який визначають з досліду.

Теплопровідність плоскої стінки



$$Q = qF = \lambda F \frac{t_{c1} - t_{c2}}{\delta} \text{ Вт}$$

Якщо площа стінки $F=1 \text{ м}^2$, товщина стінки $\delta=1 \text{ м}$ і $t_{c1}-t_{c2}=1 \text{ град}$, то $Q=\lambda$.

значення коефіцієнта теплопровідності λ для деяких матеріалів, $\text{Вт/м}\cdot\text{град}$:

Срібло	418	Водень	0,173
Чавун	62,5	Азбест	0,116
Бетон	1,28	Шлаковата.	0,07
Вода	0,545	Повітря.	0,0243

2. Конвективний теплообмін

Закон Ньютона-Ріхмана

$$Q = \alpha F(t_c - t_p) \text{Вт};$$

$$g = \alpha(t_c - t_p) \text{Вт/м}^2,$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{К}$;

F – площа поверхні;

$t_{\text{сер}}, t_{\text{ст}}$ – температура середовища і стінки.

Коефіцієнт α для деяких газів і рідин:

Газ із природною конвекцією.....	5,8---35
Газ із рухом у трубах або між ними.....	11,6---116
Пара в трубах перегрівника	116-----2320
Вода з природною конвекцією.....	116---1160
Вода з рухом у трубах.....	580---11600
Кипляча вода.....	2320---116 00
Водяна пара, що конденсується.....	4640---16 00

3. Променевий теплообмін

$$E = Q/F,$$

де E – випромінювальна здатність одиниці поверхні нагрітого тіла;

Q – загальна кількість енергії, що падає на тіло;

F – площа поверхні, на яку падає випромінювання.

$$Q = Q_A + Q_R + Q_D,$$

де Q_A – кількість поглинутої енергії;

Q_R – кількість відбитої енергії;

Q_D – кількість пропущеної енергії.

$$\frac{Q_A}{Q} + \frac{Q_R}{Q} + \frac{Q_D}{Q} = A + R + D = 1,$$

де A – поглинальна здатність тіла;

R – відбивальна здатність;

D – пропускна здатність (прозорість) тіла.

Закон Планка.

$$E = \frac{2\pi C_1}{\lambda^5} (e^{C_2/\lambda T} - 1)^{-1},$$

де $C_1=5,944 \cdot 10^{-17}$ Вт·м²; $C_2=1,4388 \cdot 10^{-17}$ м·К – перша і друга константи випромінювання.

Закон Релея-Джінса.

Якщо $\lambda T \gg C_2$, тоді

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1 T}{C_2 \lambda^4}.$$

Закон Віна.

Якщо $\lambda T \ll C_2$, тоді

$$E_{0\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5} \cdot e^{-C_2/\lambda T}.$$

Закон Стефана-Больцмана.

$$E_0 = \sigma T^4, \text{ або } Q = C_0 \cdot \varepsilon F \left(\frac{T}{100}\right)^4,$$

де $C_0=5,67$ Вт/м²К⁴ – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла;

ε – ступінь чорноти, який змінюється від 0 до 1,0 ($\varepsilon = E/E_0$).

Закон Кіргофа

Відношення випромінювальної здатності тіл до їх поглинальної здатності для всіх тіл незалежно від їх природи є однаковим і залежить тільки від температури

$$\frac{E_0}{A_0} = \frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots f(T),$$

де E_0, E_1, E_2 – випромінювальна здатність абсолютно чорного та сірих тіл відповідно;

A_0, A_1, A_2 – поглинальна здатність абсолютно чорного та сірих тіл відповідно.

Закон Ламберта.

Кількість теплової енергії, що випромінюється нагрітим тілом у напрямку холодного тіла, пропорційна випромінювальній здатності нагрітого тіла, поверхні випромінювання, куту нахилу поверхонь та тілесному куту, яким охоплюється поглинаюче тепло тіло з поверхні випромінюючого тіла.

$$Q_1 = 1/E \cdot F_1 d \cdot \cos b,$$

де E – випромінювальна здатність нагрітого тіла поверхнею F_1 ;

d – тілесний кут, під яким з нагрітого тіла видно поверхню тіла, що поглинає тепло;

b – кут, утворений нормаллю до випромінюючої поверхні та прямої, що з'єднує центри обох поверхонь.

Теплообмін між твердими тілами, у багатьох теплообмінних установках відбувається променистий теплообмін у замкнутому просторі між тілами, що мають різні температури та різну площу поверхонь (наприклад, у просторі трубчатих печей).

У цьому випадку тепло, передане тепловим випромінюванням між нагрітими тілами, визначають за формулою

$$Q = 5,67 \varepsilon_{\text{пр}} F \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right],$$

де T_1 і T_2 – температура поверхні випромінюючого (нагрітого) та поглинаючого тепло (холодного) твердого тіла відповідно, при цьому $T_1 > T_2$;

F_p – розрахункова поверхня теплообміну, що залежить від взаємного розташування тіл;

$\varepsilon_{\text{пр}}$ – приведений ступінь чорноти випромінюючого та поглинаючого тіла.

Якщо поглинаюче тіло перебуває усередині випромінюючого тіла та охоплюється ним (наприклад, екран із труб перебуває в просторі трубчастої печі), то за розрахункову беруть сумарну поверхню поглинаючого тіла, а приведений коефіцієнт ступеня чорноти знаходять за формулою

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right],$$

де $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – ступінь чорноти випромінюючого і поглинаючого тепло тіл.

Для теплообмінних апаратів кожухотрубчастих та типу “труба у трубі”, коли у внутрішніх трубах проходить високотемпературний теплоносій, а в міжтрубному просторі проходить теплоносій, що нагрівається (тепловий потік спрямований від внутрішніх труб до зовнішніх), приведений ступінь чорноти випромінюючих тіл залежить від площі поверхні та ступеня чорноти кожного з тіл, при цьому

$$\varepsilon_{\text{пр}} = 1 / \left[\frac{1}{\varepsilon_1} + F_2 / F_1 \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \right],$$

де F_1, F_2 – площа поверхні охоплюваного тіла та тіла, що охоплює, відповідно, $F_1 < F_2$.

Масообмін

В природі і техніці процеси теплообміну можуть супроводжуватись переносом маси однієї речовини в іншу, тобто *масообміном*.

Масообмін відбувається шляхом дифузії. Дифузія може відбуватися як молекулярним, так і конвективним шляхом.

Закон молекулярної чи концентраційної дифузії – *закон Фіка* – записується так

$$dM_D = -D \left(\frac{dC_i}{dx} \right) dF,$$

де dM_D – потік або кількість маси, переданої шляхом молекулярної дифузії за секунду/кг;

D – коефіцієнт молекулярної дифузії одного компонента по відношенню до іншого, м²/с;

C_i – концентрація речовини, тобто відношення маси компонента до його об’єму, кг/м³;

dC_i/dx – градієнт концентрації, кг/м³.

Знак мінус в рівнянні свідчить, що відповідно до закону Фіка, переміщення речовини відбувається в сторону зменшення градієнта концентрації.


У загальному вигляді закон Фіка записується так:

$$M_D = D \frac{C_1 - C_2}{\delta} F,$$

де δ – відстань між шарами компонентів, що розглядаються, в перпендикулярному напрямку руху речовини;

C_1 і C_2 – концентрація речовини в першому і другому шарах.

При розв'язанні конкретних задач технічного характеру використовують формули теплопередачі, конвективного теплообміну та критерії подібності.



РОЗДІЛ

2 ЛАБАРАТОРНІ РОБОТИ

Лабораторна робота № 1

Методи вимірювання температури

Лабораторна робота № 2

Градуювання термоелектричного датчика температури

Лабораторна робота № 3

Тарування електричного термометра опору

Лабораторна робота № 4

Вивчення теплопровідності багат шарової плоскої стінки

Лабораторна робота № 5.

Визначення коефіцієнта тепловіддачі при вільному і вимушеному русі повітря в горизонтальній трубі

Лабораторна робота № 6

Дослідження параметрів водяної пари за допомогою діаграми та таблиць

Лабораторна робота № 7

Дослідження процесу теплопередачі в теплообміннику «труба в трубі»

Лабораторна робота № 8

Дослідження роботи поршневого компресора

Лабораторна робота № 9

Дослідження холодильної установки компресорного типу

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1 МЕТОДИ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ

МЕТА РОБОТИ: Ознайомитись з найпоширенішими в теплоенергетиці методами вимірювання температури.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння:

ЗНАННЯ: фізичних основ контактних і безконтактних методів вимірювання температури різних діапазонів.

ВМІННЯ: підбирати та використовувати прилади для вимірювання температур.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ: моделі датчиків та зразки приладів для вимірювання температури: термopара, термометри опору, оптичний пірометр.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Методи вимірювання температури і температурні шкали

Сучасна термодинаміка визначає температуру як міру інтенсивності теплового руху молекул тіла. Її числове значення однозначно пов'язане з величиною середньої кінетичної енергії хаотичного руху молекул речовини. Тому у рівноважних умовах температура пропорційна середній кінетичній енергії частинок тіла:

$$mv_{cp}^2/2 = (3/2) \cdot (k \cdot T),$$

де m – маса молекули, v_{cp}^2 – середня квадратична швидкість молекул, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К – постійна Больцмана, T – абсолютна температура тіла.

Ця формула показує, що температура є мірою середньої кінетичної енергії молекул.

Температуру неможна виміряти безпосередньо. Про зміну температури можна судити за змінами інших фізичних властивостей тіл (об'єму, тиску, електричного опору, е.р.с., інтенсивності випромінювання тощо) однозначно з нею пов'язаних.

Любий метод вимірювання температури пов'язаний із визначенням *температурної шкали*. Як будується температурна шкала? Якщо взяти у якості основного інтервал температур між постійними точками плавлення льоду і кипіння води, позначив їх відповідно 0 і 100, у межах цих температур виміряти величину об'ємного розширення якої-небудь робочої речовини, наприклад ртуті, що знаходиться в узькому циліндричному скляному посуді, й поділив на 100 рівних частин зміну висоти її стовпчика, то в результаті буде побудована так звана *температурна шкала Цельсія*. Поділки температурної шкали називаються *градусами* і позначаються знаком °С. В даному випадку суттєвим недоліком даної шкали є недостатня точність

вимірювань. Для неї потрібно було уміння точно відтворювати як умови плавлення льоду, так і умови кипіння води.

Використовуючи другий закон термодинаміки, англійський фізик Кельвін в 1848 р. запропонував досконало точну і рівномірну шкалу, що не залежала від властивостей робочої речовини, яка отримала назву *термодинамічної температурної шкали*. Практична її побудова утруднена неможливістю здійснення зворотного циклу Карно.

Пізніше було встановлено, що термодинамічна шкала співпадає зі шкалою газового термометру, заповненого ідеальним газом, що навело на думку Д.І. Менделєєва в 1873 р. запропонувати температурну шкалу з однією опорною точкою. Його ідея була реалізована в 1954 році, коли домовились за єдину опорну еталонну точку вибирати потрібну точку води – температуру, при якій співіснують у рівновазі всі три її фази: пара – вода – лід. Цьому стану відповідає температура $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. Точку $0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$, порівняно легко відтворювану в лабораторії, й беруть за еталонну точку термодинамічної шкали, приймаючи її температуру рівною точно $273,16\text{ K}$. Звичайний нуль Цельсія відповідає температурі $273,15\text{ K}$.

Термодинамічною шкалою користуються в спеціальних, добре обладнаних лабораторіях.

В звичайних лабораторіях використовують шкалу, яка називається МПТШ68 (міжнародна практична температурна шкала, прийнята 1968 р.)

Міжнародна практична температурна шкала відтворюється за допомогою семи первинних постійних точок, що визначаються станами рівноваги (кипіння і затвердіння) ряду речовин. Цим первинним постійним точкам, які називаються реперними, віднесеним до нормального абсолютного тиску (окрім потрібної точки води), присвоєні такі числові значення:

1) $-182,97\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($90,18\text{ K}$) – температура рівноваги між рідким киснем і його паром (точка кипіння кисню);

2) $+0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($273,16\text{ K}$) – температура рівноваги між льодом, водою і водяною паром (потрібна точка води);

3) $+100,00\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($373,15\text{ K}$) – температура рівноваги між водою та її паром (точка кипіння води);

4) $+231,9681\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($505,1181\text{ K}$) – температура рівноваги між твердим і рідким оловом (точка затвердіння олова);

5) $+419,58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($692,73\text{ K}$) – температура рівноваги між твердим і рідким цинком (точка затвердіння цинку);

6) $+961,93\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1235,08\text{ K}$) – температура рівноваги між твердим і рідким сріблом (точка затвердіння срібла);

7) $+1064,43\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1337,58\text{ K}$) – температура рівноваги між твердим і рідким золотом (точка затвердіння золота)

Ці точки взяті при нормальних умовах $P=101,325\text{ кПа}$, а потрійна точка води $+0,01^{\circ}\text{C}$ ($273,16\text{ K}$) взята при тиску 661 Па .

Класифікація приладів для вимірювання температури

Межі вимірювання температури умовно діляться на дві частини: *термометрію* (контактні методи вимірювання температури), що включає визначення температур до $500 - 600^{\circ}\text{C}$ приладами, які називаються термометрами, і *пірометрію* (безконтактні методи вимірювання температури), що охоплює вимірювання більш високих температур приладами, які називаються *пірометрами*.

Для контактних методів характерне те, що прилад, яким вимірюють температуру середовища, повинен знаходитися з ним у тепловій рівновазі, тобто мати з ним однакову температуру. Основними вузлами всіх приладів для вимірювання температури є чутливий елемент (датчик), де реалізується термометрична властивість, і зв'язаний з ним вимірювальний прилад.

Вимірювальні прилади, якими визначається значення термометричної властивості (манометри, потенціометри, логометри, вимірювальні мости, мілівольтметри і т. ін.) називаються *вторинними* приладами. Точність вимірювання температури залежить від точності вторинних приладів, шкали яких зазвичай градуйовані в $^{\circ}\text{C}$.

Прилади для вимірювання температури, залежно від фізичних властивостей, покладених в основу їхньої побудови, поділяються на 5 груп.

Групи приладів	Межі вимірювання
Термометри розширення	$-190\div 500\text{ }^{\circ}\text{C}$
Манометричні термометри	$-160\div 600\text{ }^{\circ}\text{C}$
Електричні термометри опору	$-200\div 650\text{ }^{\circ}\text{C}$
Термоелектричні пірометри	$-50\div 1800\text{ }^{\circ}\text{C}$
Пірометри випромінювання	$100\div 6000\text{ }^{\circ}\text{C}$

Термометри розширення засновані на властивості тіл змінювати під дією температури об'єм, і відповідно лінійні розміри.

Манометричні термометри працюють за принципом зміни тиску рідини, газу або пари, поміщених у замкнутий об'єм, при нагріванні або охолодженні цих речовин.

Електричні термометри опору засновані на властивості провідників і напівпровідників змінювати в залежності від нагріву величину їхнього електричного опору.

Термоелектричні пірометри побудовані на властивості різнорідних металів і сплавів породжувати в парі (спаї) термоелектрорушійну силу, залежну від температури спаю.

Пірометри випромінювання працюють за принципом вимірювання випромінюваної нагрітими тілами енергії, що змінюється в залежності від температури цих тіл.

У діапазоні криогенних температур (нижче 120 K) і наднизьких (нижче 1 K) температур, окрім звичайних методів вимірювання температур, застосовують специфічні методи. Це – *магнітна термометрія* (діапазон 0,006 – 30 K; точність до 0,001 K); метод *термошумового термометра*.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. У чому перевага безконтактних методів вимірювання температур над контактними ?
2. Назвіть межі температур, які вимірюються кожним окремим методом.
3. Чому радіаційні пірометри потребують градування конкретно для тих тіл, температура яких вимірюється ?
4. Поясніть будову та принцип дії термоелектричних датчиків.
5. Поясніть будову і принцип дії пірометрів різних типів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Соловцов В.К. Контрольно-измерительные приборы. М., Профтехиздат, 1963. 236 с.
2. Мурин Г.А. Теплотехнические измерения. М., «Энергия», 1968, 584 с.
3. Тепло-массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. - М.: Энергоиздат, 1982. - 512 с.

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

1. Ознайомитись з приладами вимірювання температури, які додаються до лабораторної роботи (ртутний термометр, спиртовий термометр, термопара, термометр опору, пірометр, термометр на рідких кристалах).

2. Зарисувати (або вклеїти у звіт) схему термометра та зробити його опис, відмітивши:

- а) фізичний принцип роботи термометра;
- б) до якої групи термометр відноситься;
- в) яка шкала вимірювання, застосована в даному термометрі;
- г) рівномірність шкали вимірювання;
- д) межі вимірювання температури;
- ж) рекомендації до застосування.

3. Дати відповіді на контрольні запитання:

1. Які фізичні явища використовуються в термометрах?
2. У чому перевага безконтактних методів вимірювання температури над контактними?
3. Чому у ртутних термометрах покази температури після вимірювання зберігаються, а в спиртових ні?
4. Чому ртутні термометри використовують тільки для вимірювання позитивних температур?
5. Як вимірюють наднизькі температури?

ВІДОМОСТІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Термометри розширення

Фізичну властивість тіл змінювати свій об'єм в залежності від нагрівання широко використовують для вимірювання температури. Цей принцип покладено в основу будови *рідинних скляних і механічних термометрів*. Термометри цього типу з'явилися раніше інших приладів для вимірювання температури й слугували для створення перших температурних шкал.

В рідинних скляних термометрах, побудованих на принципі теплового розширення рідини в скляному резервуарі, в якості робочих речовин застосовують ртуть (Hg) і органічні рідини – етиловий спирт (C_2H_5OH), толуол ($C_6H_5CH_3$), пентан (C_5H_{12}) і ін. Найбільш поширеними є ртутні скляні термометри, які мають суттєві переваги порівняно із іншими, заповненими органічними рідинами: значно більший діапазон вимірювання температури при якому ртуть залишається рідкою, незмочування скла ртуттю, можливість заповнення термометра хімічно чистою ртуттю, завдяки легкості її отримання і т. ін. При нормальному абсолютному тиску ртуть знаходиться у рідкому стані при температурах від -39 (точка замерзання) до $357^\circ C$ (точка

кипіння) і має середній температурний коефіцієнт об'ємного розширення $1,8 \cdot 10^{-4} K^{-1}$.

Скляні термометри з органічними заповнювачами у більшості випадків використовуються для вимірювання низьких температур в межах $-190 \div 100^\circ C$. Основною перевагою цих заповнювачів є високий коефіцієнт об'ємного розширення, який дорівнює $1,13 \cdot 10^{-3} K^{-1}$, що майже в 6 разів перевищує аналогічний параметр у ртуті.

До механічних термометрів відносять *дилатометричні* (стерженьові) і *біметалічні* термометри, дія яких засновано на відносному видовженні під впливом температури двох твердих тіл, що мають суттєво різні температурні коефіцієнти лінійного розширення.

Дилатометричний термометр (рис. 1.2, а) має закрити з одного боку трубку 1, яку поміщають у вимірюване середовище. Трубка виготовляється з матеріалів, що мають великий коефіцієнт лінійного розширення (мідь, латунь, алюміній). У трубку вставляється стержень 2, яке прижимається до її дна важелем 3, скріпленим з пружиною 4. Циліндричний стержень виготовляється з матеріалів з малим коефіцієнтом розширення (з фарфору, кварцу або сплаву інвар). При вимірюванні температури трубка змінює свою довжину, що викликає переміщення у ній стержня, що зберігає постійний розмір і зв'язаний з важелем 3 зі стрілкою приладу.

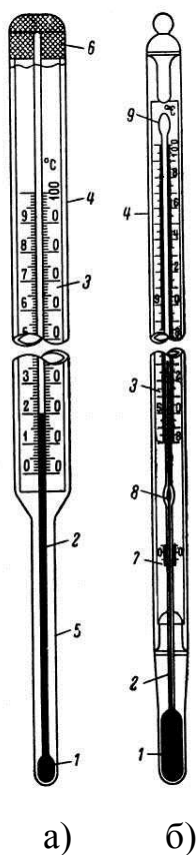


Рис. 1.1. Типи ртутних термометрів.

- а) – технічний; б) – лабораторний без нульової шкали.
 1 – резервуар; 2 – капіляр; 3 – шкала; 4 – оболонка;
 5 – нижня частина; 5 – пробка, залита гіпсом;
 7 – додаткова шкала; 8 і 9 – розширення капіляра.

Біметалічний термометр (рис. 1.2, б) складається з двох зігнутих і спаяних між собою металічних смужок, з яких смужка 1 має великий коефіцієнт лінійного розширення, а смужка 2 – малий. Така біметалічна пластинка змінює в залежності від температури ступінь свого згину, величина якого за допомогою тяги 3, важеля 4 та з'єднаної з ним стрілки вказується на шкалі приладу. При збільшенні температури біметалічна пластинка згинається у бік металу з меншим коефіцієнтом розширення.

Механічні термометри здебільшого використовуються в якості чутливих елементів у пристроях електричної сигналізації температури.

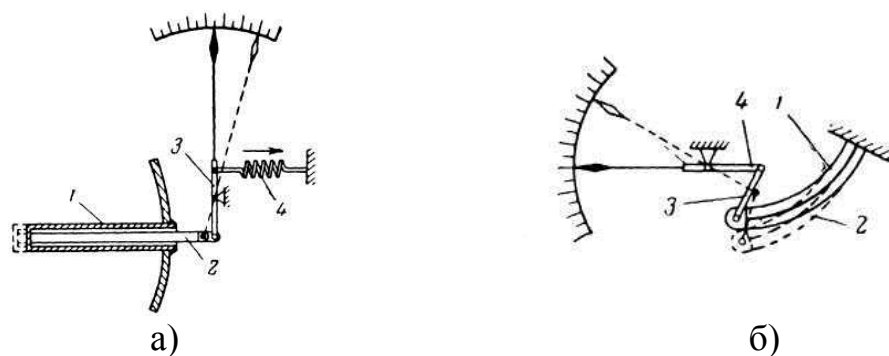


Рис. 1.2. Механічні термометри.

а) – дилатометричний; б) – біметалічний.

Манометричні термометри

Дія манометричних термометрів засновано на зміні тиску рідини, газу або пари у замкненому об'ємі (системі) в залежності від температури. Вказані термометри є технічними з класом точності 1 – 2,5, що призначені для вимірювання температури в межах до 600°C.

Манометричні термометри поділяють на *газові*, *рідинні* та *парорідинні*. Рід робочої речовини впливає на межі вимірювань і чутливість приладу.

Схема манометричного термометра показана на рисунку 1.3.

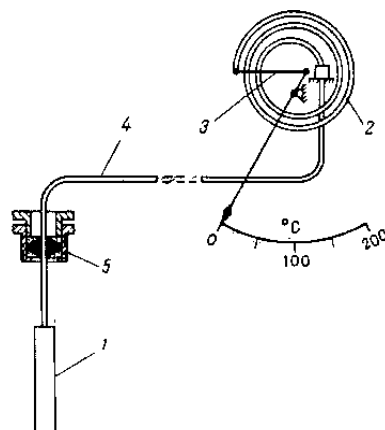


Рис. 1.3. Схема манометричного термометра.

Замкнута система приладу, заповнена робочою речовиною, складається з термобалона 1, який занурюється в середовище, трубчатої (манометричної) пружини 2, діючої за допомогою тяги 3 на стрілку або перо приладу, і капілярної трубки 4 (виготовляється з мідної або сталеві трубки з внутрішнім діаметром 0,2 – 0,4 і товщиною стінки 0,5 – 2 мм, довжина капіляра досягає 60 м), що з'єднує пружину з термобалоном. Останній являє собою сталеву або латунну трубку, закриту з одного кінця, а з іншого з'єднану з капіляром. За допомогою знімного штуцера 5 із сальниковим ущільненням та різьбою термобалон встановлюється в трубопроводах, баках і т. ін. При нагріванні термобалона тиск робочої речовини збільшується і передається через капіляр трубчастій пружині і викликає розкручування останньої до тих пір, поки діюче на неї зусилля, пропорційне різниці тисків в системі і навколишньому повітрі, не зрівноважиться силою пружної деформації трубки.

Порівняно із ртутними скляними термометрами мають ряд переваг: автоматичний запис показань, можливість розташування вторинного пристрою на відстані від місця вимірів, достатня механічна міцність. До недоліків відносять: невисока точність, інерційність, низька ремонтпридатність.

Електричні термометри опору

Для вимірювання температури широке застосування отримали термометри опору, засновані на зміні електричного опору металічних провідників або напівпровідникових матеріалів в залежності від температури.

Як відомо, метали при нагріванні збільшують свій опір, а напівпровідники – зменшують. Отже, маючи залежність опору провідника (напівпровідника) від температури (рис. 1.4.) і визначаючи цей опір за допомогою електровимірювального приладу, можна робити висновки про температуру провідника (напівпровідника).

Термометри опору, виготовляються з тонкої металічної (мідної або платинові) проволочки, намотаної на каркас із електроізоляційного матеріалу (слюди, кварцу, пластмаси) і поміщеної у металічний захисний чохол з головкою для підключення з'єднувальних провідників.

Напівпровідникові термометри опору – терморезистори, виготовляють із порошкової суміші окислів деяких металів (марганцю (Mn_2O_3), міді (Cu_2O_3), кобальту (CoO), нікелю (NiO) та ін.), спресованої та спеченої при високій температурі.

Терморезистори (рис. 1.5.) являють собою об'ємні нелінійні резистори різної форми (циліндричні, дискові, шайбові, як намистина і ін.) і мають

від'ємний температурний коефіцієнт, тобто при нагріванні зменшують свій опір.

При температурі 50°C й нижче значення їхнього температурного коефіцієнта у 5 – 10 разів більше, ніж у металів, що впливає на порівняно більшу зміну опору R в залежності від температури, який визначається за формулою:

$$R = Ae^{B/T},$$

де A і B – постійні, що залежать від властивостей напівпровідника; T – абсолютна температура терморезистора, °K; e – основа натуральних логарифмів.

Більш детально конструкційні особливості термометрів опору і терморезисторів розглянуто в лабораторній роботі №3.

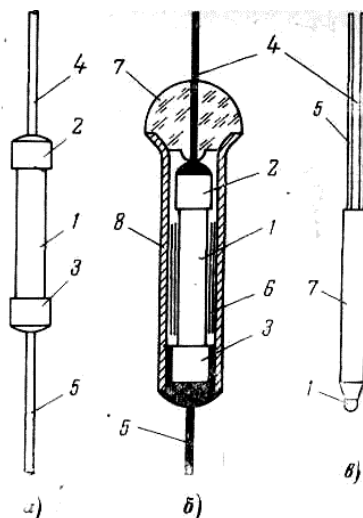
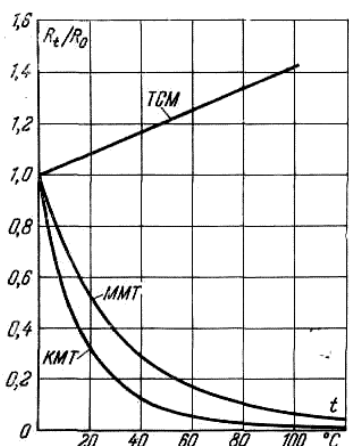


Рис. 1.4. Залежність відносного опору терморезисторів від температури.

Рис.1.5. Терморезистори: а – циліндричні типу ММТ-1 і КМТ-1; б – циліндричні захищені типу ММТ-4 і КМТ-4; в – у формі намистини – КМТ-14: 1-напівпровідниковий елемент; 2,3-контактні ковпачки;4,5-виводи; 6-металічна фольга; 7-скляний ізолятор; 8-метлевий чохол.

Термоелектричні пірометри

Принцип дії термоелектричних пірометрів засновано на властивості металів і сплавів створювати *термоелектрорушійну силу* (т. е. р. с.), яка залежить від температури місця з'єднання (спая) двох різнорідних провідників, що утворюють так звану *термопару* або первинний прилад пірометра (термоелектричний датчик). Вторинним приладом, яким

вимірюється генерована термопарою термо- е. р. с., є чутливий електровимірювальний прилад (гальванометр, мілівольтметр і ін.). Діапазон вимірюваних термоелектричними пірометрами температур знаходиться в межах $-50 \div 1800 \text{ }^\circ\text{C}$.

Термоелектричні пірометри широко застосовуються в енергетичних установках для вимірювання температури перегрітої пари, димових газів, метала труб котлів та інших частин обладнання і т. ін. Позитивними властивостями їх є: великі межі вимірювання, висока чутливість, незначна інерційність, відсутність стороннього джерела струму і легкість здійснення дистанційної передачі показів завдяки електричному принципу дії.

Термоелектричний пірометр складається з термопари і підключеного до неї з'єднувальними провідниками вторинного електровимірювального приладу. Застосовується два способи включення останнього в контур термопари: у вільний кінець або в один з її термоелектродів (рис. 1.6).

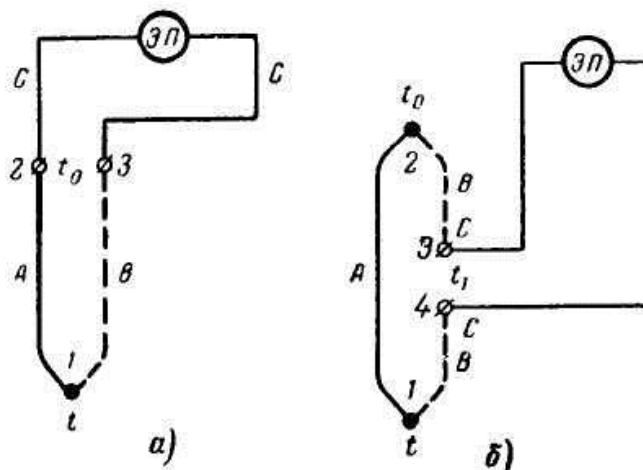


Рис. 1.6. Способи включення електровимірювального приладу в контур термопари: *а* – у вільний кінець; *б* – в термоелектрон

Спай 1, занурюється у середовище, температуру якого необхідно виміряти і називається *робочим кінцем* термопари (гарячий спай), а спай 2 – *вільним кінцем* (холодний спай). Вимірювання температури за допомогою термопари можливо лише при постійній і точно відомій температурі її вільного кінця t_0 , тоді величина т. е. р. с. буде прямо пропорційна температурі робочого спая: $E_{AB(t, t_0)} = f(t)$.

У таблиці 1.1 приведені величини термо- е. р. с., які з'являються між різними провідниковими матеріалами у парі з платиною при температурі робочого спая (1) $t=100^\circ\text{C}$ і вільного кінця (2) $t_0=0^\circ\text{C}$.

Таблиця 1.1

Матеріал	Термо-ЕРС	Матеріал	Термо-ЕРС
Хромель	+2,95	Олово	+0,42
Ніхром	+2,0	Алюміній	+0,40
Залізо	+1,8	Платина	0
Вольфрам	+0,79	Алюмель	-1,2
Мідь	+0,75	Нікель	-1,52
Золото	+0,8	Константан	-3,4
Цинк	+0,7	Копель	-4,0
Срібло	+0,72	Пірит	-12,1
Свинець	+0,44	Молібден	від -69 до -104

За допомогою табл.1 і рівняння $E_{AB(t, t_0)} = E_{AC(t, t_0)} - E_{BC(t, t_0)}$ можна визначити термо-е.р.с. термопари, складеної з двох любих вказаних у таблиці термоелектродів.

До термопарних матеріалів пред'являються такі вимоги:

- 1) механічна та хімічна стійкість при високих температурах, антикорозійність;
- 2) хороша електропровідність і невелика величина температурного коефіцієнта електричного опору;
- 3) постійність термоелектричних властивостей (їхня незалежність від зміни з часом внутрішньої структури (рекристалізація) і забруднення поверхні);
- 4) однозначна і по можливості лінійна залежність термо- е. р. с. від температури.

Пірометри випромінювання

Пірометри випромінювання застосовуються для вимірювання температури нагрітих тіл в межах 100 – 6000 °С. Дія цих приладів заснована на вимірюванні енергії випромінювання тіла, що залежить від його температури і фізико-хімічних властивостей. Перевагою безконтактних методів вимірювання температури є те що первинний прилад пірометра випромінювання при вимірюванні не піддається шкідливому впливу високої температури і не викривлює температурне поле, оскільки знаходиться далеко від вимірюваного середовища.

Датчики температури (первинні прилади), засновані на вимірюванні інтенсивності випромінювання нагрітого тіла, можуть бути побудовані різними методами, які розглядаються нижче.

Вимірювання яскравості монохроматичного випромінювання тіла. З повного спектру випромінювання «вирізується» за допомогою світлофільтрів вузька смуга від λ до $\lambda + \Delta\lambda$, яскравість якої визначається безпосередньо або шляхом порівняння з яскравістю еталонного джерела і буде мірою температури тіла, яке випромінює теплову енергію. Яскравість монохроматичного випромінювання пропорційна його інтенсивності і визначається законом Планка:

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

де $E_{\lambda T}$ – інтенсивність монохроматичного випромінювання абсолютно чорного тіла для довжини хвилі λ ;

T – температура тіла в $^{\circ}K$;

c_1 і c_2 – постійні ($c_1 = 1,44 \cdot 10^{-3} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; $c_2 = 1,432 \cdot 10^{-2} \text{ м}/K$);

e – основа натуральних логарифмів.

Градування датчиків даного типу (пірометрів часткового випромінювання) виконується за абсолютно чорним тілом, тому виміряна температура реального тіла T_y (яскравісна температура) буде відрізнятися від істинної T і може бути визначена із рівняння:

$$1/T_y = 1/T - \lambda/c_2 (\ln \varepsilon_{\lambda}).$$

У таблиці 1.2 приведені значення ε_{λ} для різних матеріалів.

Таблиця 1.2

Найменування матеріалу	ε_{λ}	Найменування матеріалу	ε_{λ}
Срібло	0,07	Залізо	0,39
Мідь	0,11	Вольфрам	0,45
Золото	0,13	Мідь окислена	0,7
Платина	0,33	Залізо окислене	0,95

В оптичних пірометрах здебільшого використовується вузька смуга спектру в області червоного випромінювання ($\lambda=0,6 \div 0,7 \text{ мкм}$), яка «вирізається» світлофільтром.

Вимірювання повного випромінювання тіла (радіаційна пірометрія).

Даний метод використовує повну енергію спектру (теоретично від). Інтенсивність повного випромінювання може бути визначена шляхом інтегрування виразу закону Планка в межах від $\lambda = 0$ до $\lambda = \infty$. Отримана залежність називається законом Стефана – Больцмана:

$$E_m = \sigma T^4,$$

де $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot K)$ – коефіцієнт випромінювання абсолютно-чорного тіла.

Для реальних тіл інтенсивність повного випромінювання E_p завжди менше інтенсивності повного випромінювання чорного тіла E_T і характеризується коефіцієнтом чорноти випромінювання тіла ε_T , який визначається законом Кірхгофа:

$$\varepsilon_T = E_p / E_T.$$

В табл.1.3 наведені значення ε_T для деяких матеріалів при різних істинних температурах.

Таблиця 1.3

Матеріал	Температура в °C	ε_T
Срібло	1000	0,035
Нікель	1000 – 1400	0,056 – 0,069
Залізо	1000 – 1400	0,08 – 0,13
Мідь розплавлена	1100 – 1300	0,13 – 0,15
Вольфрам	1000 – 3000	0,15 – 0,34
Чавун	1300	0,29
Вугілля	1100 – 1500	0,52
Цегла шамотна	1100	0,75
Окис заліза	500 – 1200	0,85 – 0,89

Із закону Кірхгофа випливає, що температура T_p , виміряна методом повного випромінювання сірого тіла завжди менша істинної температури тіла T . Температура називається радіаційною температурою сірого тіла. Її зв'язок з істинною температурою визначається виразом:

$$T_p = T (\varepsilon_T)^{1/4}.$$

При вимірюванні інтенсивності повного випромінювання необхідно враховувати, що частина енергії, яка випромінюється нагрітим тілом, поглинається середовищем між датчиком і випромінювачем. Якщо відомо коефіцієнт поглинання середовища n , то поправка на поглинання в середовищі може бути знайдена за допомогою такого рівняння:

$T_p = T_p' / (1 - n)^{1/2}$, де T_p' – радіаційна температура без врахування поглинання.

Вимірювання повного поглинання проводиться за величиною вимірювання температури T_2 зачорненої поверхні приймача (болметра), на яку фокусується потік енергії. Енергія, яка передається болметру визначається різницею четвертих ступенів температур випромінювача і приймача: $E_T = \sigma(T_1^4 - T_2^4)$.

Порівнюючи вище названі безконтактні методи вимірювання температури можна зробити такі висновки:

Методи засновані на вимірюванні яскравісної і радіаційної температур, мають загальні недоліки, оскільки яскравісна і радіаційна температури значно відрізняються від істинної температури тіла. Тому при вимірюванні необхідно враховувати коефіцієнти чорноти випромінювання реальних тіл, що у більшості випадків дуже важко здійснити.

Пірометри часткового випромінювання. В пірометрі часткового випромінювання, який також називається оптичним пірометром, відбувається порівняння монохроматичної яскравості (у променях певної довжини хвилі) нагрітого тіла (випромінювача), температуру якого вимірюють, і розжарення нитки вмонтованої в прилад пірометричної лампи. При вимірюванні яскравісної температури дугоподібну нитку лампи крізь оптичний телескоп наводять на поверхню випромінювача і добиваються зрівняння яскравості обох джерел світла шляхом зміни реостатом сили струму, що живить лампу.

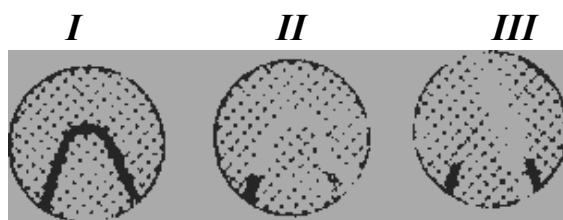


Рис. 1.7. Яскравість нитки розжарення пірометра часткового випромінювання. *I* – температура нитки нижче температури випромінювача; *II* – температура нитки вище температури випромінювача; *III* – температура нитки рівна температурі випромінювача.

Якщо яскравість нитки буде менше, ніж яскравість випромінювача (рис. 1.7), то на світлому фоні нитка буде здаватися чорною (стан *I*); якщо ж, навпаки, випромінювач має меншу яскравість, нитка буде проектуватись світлою лінією на більш темному фоні (стан *II*). При збіганні монохроматичної яскравості нитки і випромінювача, тобто при настанні стану рівноваги, зображення середньої вигнутої частини нитки, яка має більш високу температуру, ніж її кінці, зливається із світлим фоном випромінювача і начебто зникне з поля зору спостерігача (стан *III*). В цей момент і відбувається відлік яскравісної температури тіла за шкалою амперметра, включеного у сітку пірометричної лампи та градуйованого в °С.

Будова пірометра часткового випромінювання показана на рисунку 1.8, який призначено для періодичних вимірювань температури у межах 800 - 2000 °С. Він складається з телескопа *T* з добудованим до нього

диференційним амперметром та джерела постійного струму B , напругою $2 - 2,5 \text{ В}$.

Телескоп пірометра являє собою розширену посередині зорову трубу 1 із об'єктивом 2 і окуляром 3 . У фокусі об'єктива встановлено пірометричну лампу 4 з дугоподібною вольфрамовою ниткою, з'єднаною послідовно з реостатом 5 , за допомогою якого можна змінювати розжарення нитки. Реостат розміщено у широкій частині зорової труби й оснащено рукояткою-кільцем 6 із повзунком 7 , який дозволяє спостерігачу регулювати струм, не відволікаючись від яскравості нитки.

Для отримання монохроматичного випромінювання з довжиною хвилі $0,65 \text{ мкм}$ поперед окуляра встановлено червоний скляний світлофільтр 8 , а за ним – вихідна діафрагма 9 , пере якою при вимірюванні знаходиться око спостерігача.

Між об'єктивом і пірометричною лампою поміщено поглинаюче скло 10 , прикріплене на обертовій головці 11 , за допомогою якої воно може бути поставлене поперед лампи або відведене в сторону. Поглинаюче скло необхідне для збільшення верхньої межі показів пірометра, оскільки воно послаблює видиму яскравість випромінювача в декілька раз при незмінній яскравості нитки лампи. Вольфрамову нитку пірометричної лампи неможна нагрівати вище 1500° С , так як при цьому може бути порушено градування шкали приладу із-за розпилення (зменшення товщини) нитки при її надмірному розжаренні та забрудненні при цьому внутрішніх стінок колби лампи. Тому вбудований у телескоп пірометра диференційний амперметр, який складається з двох рамок (основної 12 та допоміжної, увімкнених зустрічно), постійного магніту 13 , стрілки 14 і шкали 15 , має два діапазони вимірювань (подвійну шкалу): перший – при роботі без поглинаючого скла із межами $800 - 1400^\circ \text{ С}$ і другий – при введеному склі з межами $1200 - 2000^\circ \text{ С}$.

Основна рамка амперметра включена паралельно пірометричній лампі, а додаткова – послідовно з лампою. Таке включення рамок приладу дозволяє зменшити початкову неробочу ділянку шкали пірометра. Для встановлення нуля амперметр має коректор, гвинт якого знаходиться із зовні телескопа.

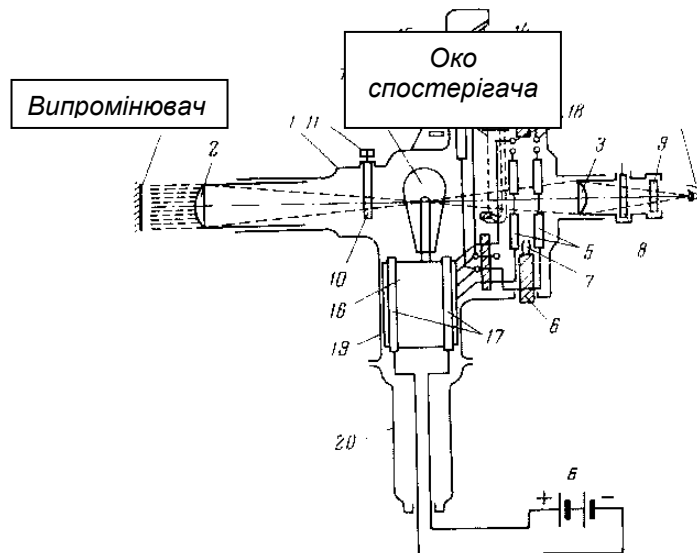


Рис. 1.8. Схема пірометра часткового випромінювання.

Пірометрична лампа встановлена на колодці 16 з двома контактними стрижнями 17, до яких підключено проводи від лужного акумулятора, розташованого для зручності переноски у спеціальній сумці. Кожен прилад має індивідуальне градуювання, дійсне тільки для даної пірометричної лампи. При заміні лампи шкала приладу підлягає переградуюванню. Сила струму, що споживає лампа при нагріванні її до 1400°C , складає біля $0,4\text{ A}$.

При повороті кільцевої ручки 6 уліво до упора движок 7 сходять з обмотки реостата і розриває коло накаливання нитки, що призводить до виключення лампи. Одночасно із цим в крайньому лівому положенні движок за допомогою двох кінцевих контактів 18 замикає на коротко основну рамку амперметра, здійснює при цьому електричне аретування рухливої частини приладу, що є необхідним при переносці пірометра.

У процесі вимірювання температури наводка пірометра на випромінювач здійснюється в ручну, для чого відросток 19 телескопа має знизу рукоятку 20. Для настройки оптичної системи пірометра на фокус і за оком спостерігача об'єктив 2 і окуляр 3 можуть переміщуватися упродовж осі зорової труби. Оптична система приладу дозволяє вимірювати температури на відстанях $0,7 - 5\text{ м}$ від джерела.

На точність вимірювання пірометром часткового випромінювання впливає ступінь відхилення властивостей випромінювача від властивостей абсолютно чорного тіла, а також величина поглинання променів проміжного середовища, крізь яку здійснюється спостереження. На результати вимірювань впливають наявність у навколишньому повітрі пилу, диму і великий вміст двоокису вуглецю. Крім цього, забруднення оптичної системи пірометра, також веде до збільшення похибки вимірювання. Основна похибка

пірометра типа ОППИР-017 для першого и другого діапазонів вимірювання відповідно дорівнює ± 20 и $\pm 30^\circ \text{C}$.

Перевагою пірометра часткового випромінювання є порівняно висока точність вимірювання, компактність приладу і простота поводження з ним. До недоліків слід віднести потребу у джерелі живлення, неможливість стаціонарного вимірювання температури і автоматичного запису показів, а також суб'єктивність методу вимірювання, оснований на спектральній чутливості зору спостерігача.

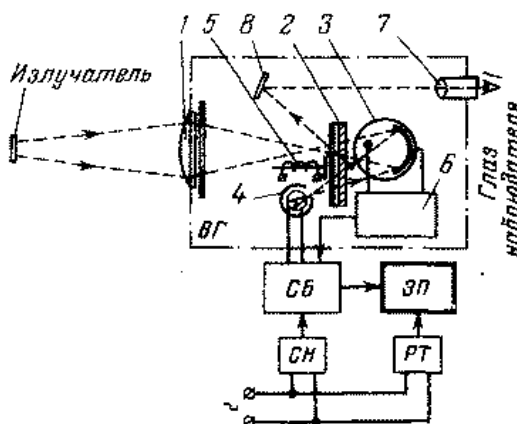


Рис. 1.9 Схема фотоелектричного пірометра ФЕП-4

1- об'єктив, 2- червоний світлофільтр, 3- фотоелемент, 4- лампа розжарення (призначена для отримання зворотного зв'язку по світловому потоку), 5- заслінка, 6- електронний підсилювач, 7- окуляр, 8- відбивач.

Фотоелектричні пірометри. Прилади цієї групи, оснований на вимірюванні температури за інтенсивністю монохроматичного випромінювання застосовуються для визначення температури нагрітих тіл у межах $500 - 4000^\circ \text{C}$. Вони мають ряд переваг, оскільки температура визначається об'єктивним та без інерційним методом. Дія фотоелектричного пірометра заснована на властивості фотоелемента змінювати фотострум пропорційно світловому потоку, який падає на нього від випромінювача.

Фотоелектричні пірометри застосовуються для вимірювання швидкоплинних теплових процесів.

На рис. 1.9 показана схема фотоелектричного пірометра типа ФЕП-4 з межами вимірювань $800 - 1300^\circ \text{C}$. Прилад складається з візирної головки ВГ, силового блока СБ, ферорезонансного стабілізатора напруги СН, швидкодіючого електронного потенціометра ЭП и роздільного трансформатора РТ.

Фотоелектричний пірометр дозволяє виконувати вимірювання температури на відстані $0,2 \text{ м}$ и більше від джерела, причому діаметр

нагрітої поверхні не повинен бути менше $1/22$ цієї відстані. Клас точності приладу 1.

Радіаційні пірометри. *Рефракторний датчик повного випромінювання.*
На рис. 1.10 показано схематично будову датчика повного випромінювання з відкритою багатоспайною термобатареею. Термобатарей (рис. 1.11) виготовлена з десяти послідовно з'єднаних термопар. Робочі кінці термопар, розклепані у формі трикутників, розташовані у вигляді вінчика. Вільні кінці термопар приварені до тонких металевих смужок, прикріпленим до слюдяного кільця, яке має гарний тепловий контакт з корпусом датчика. Для компенсації похибки при коливаннях температури корпусу датчика термобатарей зашунтована нікелевим опором 5 (рис. 1.10). Зміна температури корпусу датчика на 1° у межах від 20 до 40° С змінює покази датчика на $0,11^\circ$ С при температурі джерела випромінювання 900° С.

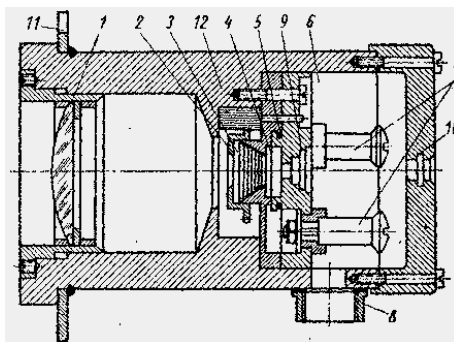


Рис. 1.10 Датчик повного випромінювання з відкритою термобатареею:
1 – лінза; 2 – діафрагма; 3 – передня камера; 4 – термобатарей;
5 – компенсаційна котушка; 6 – задня камера; 7 – затискач термобатарей;
8 – штуцер; 9 – візирний отвір; 10 – окуляр; 11 – фланець; 12 – корпус.

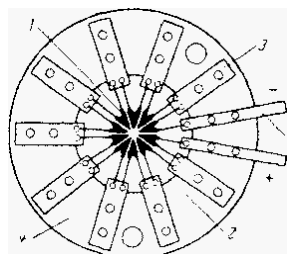


Рис. 1.11. Термобатарей пірометра повного випромінювання.

Магнітна термометрія

Вимірювання наднизьких температур. До наднизьких температур, або гелієвих відносяться температури одержані за допомогою рідкого гелію (температура кипіння $4,2$ К). Специфіка методів вимірювання температур

обмежує цей діапазон значеннями від 0 до 10 K. Існуючі методи вимірювання наднизьких температур розповсюджуються лише на окремі ділянки цього діапазону. Наприклад, для вимірювання температур від 1 до 4 K використовуються терморезистори з фосфористої бронзи з дрібними включеннями свинцю. При температурі 4,2 K свинець переходить у стан надпровідності і опір таких терморезисторів різко змінюється. Тому вимірювання температур з використанням такого датчика обмежене межами від 1,5 до 4,2 K.

Для вимірювання температур нижче 1K використовуються методи магнітної термометрії, основані на залежності об'ємної магнітної сприйнятливості n ряду парамагнітних солей від абсолютної температури T , яка описана законом Кюрі-Вейса:

$$n = \Delta / (c - T),$$

де c і Δ — постійні, характерні для використаної солі.

Термометр, у якому використовується ця залежність, являє собою котушку індуктивності, всередині якої у досить однорідному магнітному полі розміщений зразок мідно-калієвих або залізо-алюмінієвих квасців. Котушка вмикається у мостове коло і зміна температури, яка викликає зміну об'ємної магнітної сприйнятливості зразка, приводить до зміни індуктивності котушки, пропорційної вимірюваній температурі.

Метод термошумового термометра

Тепловий рух електронів у провідниках викликає появу шумових напруг, величина яких пропорційна абсолютній температурі. Середнє значення напруги, створеної шумами, між кінцями провідника опором R у смузі частот $f_2 - f_1$ визначається рівнянням Найквіста:

$$U_{ш}^2 = 4kTR(f_2 - f_1) \text{ де } k - \text{постійна Больцмана; } T - \text{абсолютна температура.}$$

Абсолютні величини шумових напруг дуже низькі (при $R = 10^4$ Ом, $T = 273$ K, $f_2 - f_1 = 20$ кГц, $U_{ш} = 28,5 \cdot 10^{-6}$ В) і для їх вимірювання потребуються надчутливі підсилювачі. Для виключення впливу шумів у опорах вимірювальної схеми застосовуються диференційні схеми, у яких порівнюються величини $U_{ш}$ на опорах R_1 та R_2 , один з яких знаходиться при невідомій температурі T_1 , а інший при відомій T_2 . Величину R_2 змінюють до отримання однакових значень $U_{ш}$, при цьому $T_1 = (R_2/R_1) T_2$ (застосовуються проволочені або плівкові опори).

Рідкокристалічний термометр TN – 27

Принцип роботи термометра базується на зміні кольору на пластинці в залежності від температури тіла людини. Індикація зеленого кольору у

віконці приладу свідчить про нормальну температуру. Якщо індикація зеленого кольору не з'явилась, для отримання коректного показника температури треба відняти $0,3^{\circ}\text{C}$ від найвищого значення, що висвітилось на приладі іншим кольором.

При вимірюванні треба звертати увагу на кольорові коди температур.

Зелений вказане значення температури;

Коричневий від отриманого значення температури треба відняти $0,3^{\circ}\text{C}$;

Блакитний до отриманого значення температури треба додати $0,3^{\circ}\text{C}$.

Точність вимірювання температури складає $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$. Діапазон вимірювань – від $+5^{\circ}\text{C}$ до $+65^{\circ}\text{C}$, при відносній вологості – від 15% до 95%.

Конструктивно представляє пластмасову пластину на якій нанесений шар рідкого кристалу. Застосовується для швидкого і зручного вимірювання температури тіла людини в області лоба. Для подовження терміну використання прилад оберігають від прямих сонячних променів.

Принцип дії рідкокристалічних термометрів зберігається і в складніших приладах, які дають покази температури на екран.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2
**ГРАДУЮВАННЯ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНОГО ДАТЧИКА
 ТЕМПЕРАТУРИ**

МЕТА РОБОТИ: Ознайомитись з будовою та принципом дії термоелектричних датчиків вимірювання температури. Навчитись градуювати термопару.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння:

ЗНАННЯ: фізичних основ роботи термоелектричного датчика температури та компенсаційного метода вимірювання термо-е.р.с..

ВМІННЯ: підбирати матеріали для термопар, градуювати термоелектричний датчик.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ: Хромель-копельова термопара. Установка для градуювання термопари.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Експериментально отримана залежність термо-е.р.с. $E_{AB}(t, t_0)$ термопари від температури робочого кінця t при постійній температурі вільних кінців t_0 , зазвичай рівною $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, називається градуюванням термопари. На основі цієї залежності складаються таблиці градуювання (табл. 2.2.) і графіки (рис. 2.2.) для практичного користування.

Табл. 2.2

Таблиці градуювання термопар

Температура гарячого спая в $^{\circ}\text{C}$	Термо-е.р.с. термопар в мВ при температурі в $^{\circ}\text{C}$ для градування:					
	ПП-1	ПР30/6	ХА	ХК	З	М
0	0	0	0	0	0	0
100	0,643	—	4,10	6,95	5,15	4,16
200	1,436	—	8,13	14,66	10,60	8,87
300	2,314	0,456	12,21	22,91	16,25	14,13
400	3,249	0,812	16,46	31,49	21,90	20,04
500	4,218	1,268	20,65	40,16	24,60	26,19
600	5,220	1,821	24,91	49,02	30,35	—
700	6,256	2,467	25,15	57,77	39,30	—
800	7,325	3,201	33,32	66,42	45,50	—
900	8,428	4,019	37,37	—	—	—
1000	9,564	4,913	41,32	—	—	—
1100	10,732	5,876	45,16	—	—	—
1200	11,923	6,902	48,87	—	—	—

1300	13.129	7,982	52,43	—	—	—
1400	14.398	9,109	—	—	—	—
1500	15,597	10.274	—	—	—	—
1600	16,714	11,471	—	—	—	—
1800	—	13,927	—	—	—	—

Величину термо-е.р.с. термопар, можна виміряти компенсаційним методом, схема якого зображена на рис. 2.1.

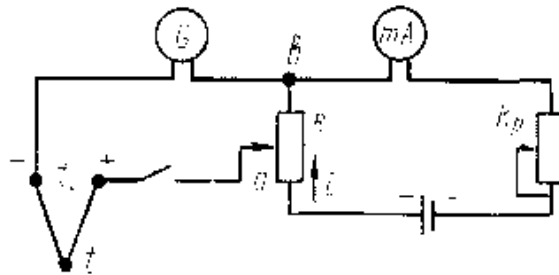


Рис. 2.1. Схема компенсаційного метода визначення термо-е.р.с.

Сутність методу полягає у порівнянні значення термо-е.р.с., що розвиває термопара $E_{TK(t,t_0)}$ із падінням напруги ΔU_{ab} на спільній ділянці кола R_{ab} , створеної стабілізованим джерелом постійного струму, коло якого називається компенсаційним. Компенсація термо-е.р.с. відбувається в той момент часу коли величина падіння напруги на ділянці ab чисельно буде дорівнювати величині термо-е.р.с.: $E_{TK(t,t_0)} = \Delta U_{ab}$. При цьому стрілка гальванометра G показуватиме нульову поділку шкали. Якщо термо-е.р.с. термопарі відрізнятись за значенням від спаду напруги на ділянці ab , то у колі термопарі з'явиться струм, який виявлятиметься за відхиленням стрілки гальванометра від нульового позначення.

Величину спаду напруги на ділянці ab можна регулювати двома способами:

1. Змінюючи величину опору ділянки R_{ab} , пересуваючи рухомий контакт реохорда R і підтримуючи при цьому постійною силу струму i в компенсаційному колі;

2. Змінюючи величину сили струму i_{ab} в компенсаційному колі за допомогою магазину опорів R_p і підтримуючи постійним опір R_{ab} . Значення сили струму контролюють міліамперметром.

В обох випадках добиваються компенсації, поки стрілка гальванометра не встановиться на нуль. Після цього визначають значення термо-е.р.с. термопари:

$$E_{XK(t,t_0)} = \Delta U_{ab} = i_{ab} R_{ab}$$

Термопара може бути використана для вимірювання температури тільки у тому випадку, якщо для неї знято криву градування. Градування виконується за еталонною термопарою таким чином. Робочі кінці еталонної та градуйованої термопар нагріваються до однакової температури і одночасно вимірюється термо-е.р.с. кожної з них. За величиною термо-е.р.с. еталонної термопари визначають температуру середовища, в яке поміщені робочі кінці термопар. Використовуючи ці дані, будують криву градування (рис. 2.2.).

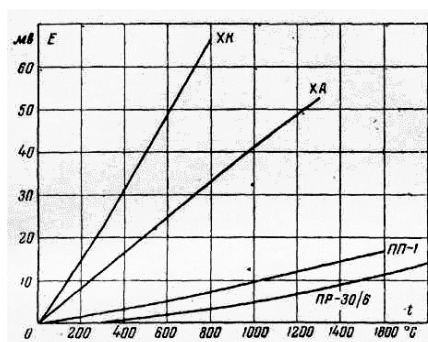


Рис.2.2. Графіки градування термопар

Для нагрівання робочих кінців термопар використовують спеціальну трубчасту піч із максимальною температурою нагріву до 800 °С. Однорідне рівномірно нагріте середовище створюють за допомогою латунного циліндра. Робочі кінці еталонної та градуйованої термопар вводять в канали цього циліндра і разом з ним поміщають у центральну частину трубчатої печі. Обидва отвори печі ретельно закривають азбестовими пробками. Місця з'єднання електродів з мідними провідниками опускають у термостат.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Користуючись табл.2.1. визначити, які термопари найбільше підходять для вимірювання температури розплавлених кольорових металів.
2. Поясніть фізичну сутність роботи термопари.
3. Чому температуру холодного спаю необхідно підтримувати постійною?
4. В чому полягає принцип компенсаційного визначення значення термо-е.р.с.?

ЛІТЕРАТУРА:

1. Соловцов В.К. Контрольно-измерительные приборы. М., Профтехиздат, 1963. 236 с.
2. Мурин Г.А. Теплотехнические измерения. М., «Энергия», 1968, 584 с.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Встановити рухомий контакт реохорда R на довжину l , що відповідає величині опору R_{ab} , заданого викладачем. Довжину дроту визначають за формулою: $l = R_{ab}/\rho$, де ρ – лінійний питомий опір дроту реохорда, вказаний на його панелі.

2. Включити у мережу стабілізоване джерело постійного струму і регулюючи опір R_p встановити початкове значення сили струму $i_{ab}=5mA$. Дані занести в таблицю 2.3.

3. За допомогою корекційного гвинта встановити світловий штрих оптичного гальванометра на нульову позначку.

4. Виміряти термометром початкову температуру робочого та вільних кінців градуйованої термопари t_o і t' . Дані занести в таблицю 2.3.

5. Включити у мережу електропіч установки й слідкуючи за показами вторинного приладу еталонної термопари, шкала якого проградуйована в $^{\circ}C$, здійснити виміри величини термо-е.р.с. досліджуваної термопари другим методом через кожні $50^{\circ}C$ до температури $500 - 600^{\circ}C$. Дані вимірної сили струму i_{ab} занести до таблиці 2.3. Для здійснення рівномірного нагріву печі необхідно періодично вимкнути її з мережі 220 В.

6. Всі виміри повторити при охолодженні печі до $50^{\circ}C$.

7. Побудувати криву градування даної термопари, відклавши по осі X температуру у градусах Цельсія, а по осі Y – величину термо-е.р.с. у мілівольтах. На цій кривій помітити температуру вільних кінців термопари.

Якщо за умовами досліду не можна підтримувати постійною температуру вільних кінців під час градування термопари, то визначаючи

температуру в електропечі, необхідно вводити відповідну поправку на температуру вільних кінців за формулою:

$$E(t, t_0) = E(t, t') \pm E(t', t_0),$$

де t_0 – температура вільних кінців термопару при градуванні;

t' - температура вільних кінців при вимірюванні; t – фактична температура робочого кінця термопару; $E(t, t')$ – середнє значення термо-е.р.с. за час досліду; $E(t', t_0)$ – поправка на температуру холодних спаїв; $E(t, t_0)$ – середнє значення термо-е.р.с. з урахуванням поправки на температуру холодних сплавів (знак «+» беруть коли $t' > t_0$; знак «-» коли $t' < t_0$). Фактична температура робочого кінця термопару розраховується як сума показів еталонної термопару і температури вільних кінців при вимірюванні.

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

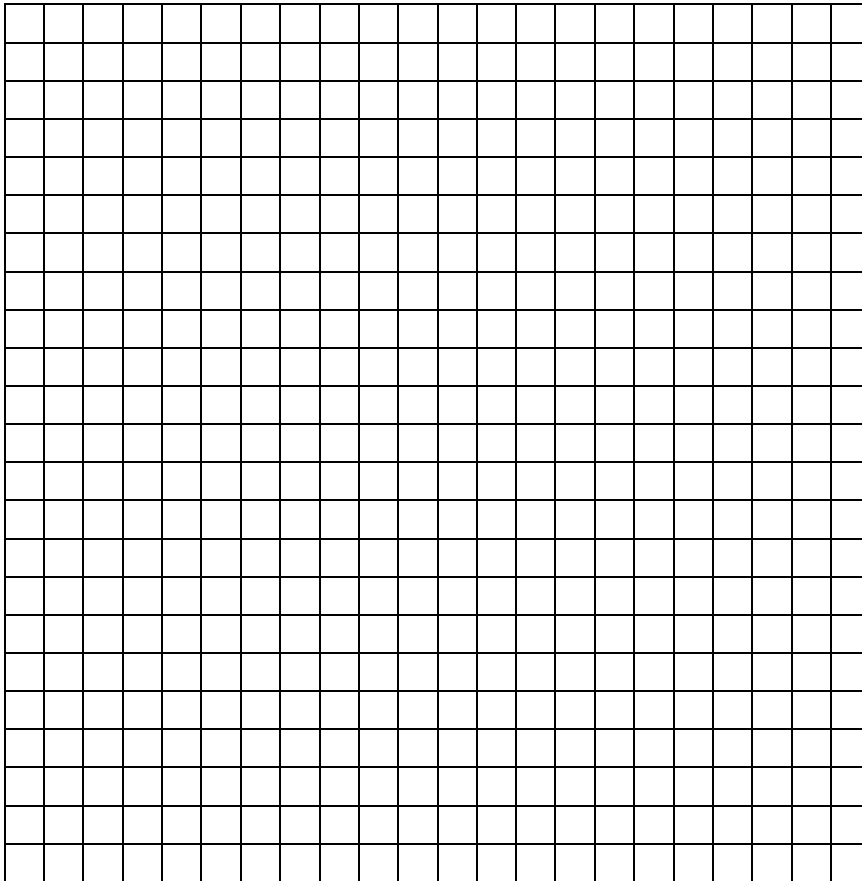
1. Привести результати розрахунку опору R_{ab} ділянки a в лінійного реохорда.
2. Результати вимірювання температури при нагріванні та охолодженні електропечі та розрахунки величини термо-е.р.с. термопару занести до таблиці 2.3.

Табл.2.3.

№ з/п	В и м і р ю в а н а в е л и ч и н а								
	$t,$ °C	$t',$ °C	$t_0,$ °C	$i,$ mA	$R_{ab},$ Ом	$\Delta U_{ab},$ mV	$E(t, t'),$ mV	$E(t', t_0),$ mV	$E(t, t_0),$ mV
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									
13									
14									
15									
16									
17									

18									
19									
20									
21									
22									

3. За експериментальними даними та результатами розрахунків величини термо-е.р.с. побудувати криву градування.



4. Зробити висновок

ВІДОМОСТІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Термоелектричним датчиком температури або термопарою називають спай двох різнорідних металів. Принцип вимірювання температури термопарою засновано на явищі термоелектрики, яке полягає у виникненні в різнорідних провідниках термоелектрорушійної сили при наявності різниці температур між точками їх з'єднання (див. лаб. роб. № 1). Це явище було відкрите у 1821 р. німецьким фізиком Т.І. Зеєбеком. Механізм виникнення термо-е.р.с. засновано на тому, що концентрація у міжмолекулярному

просторі провідника вільних електронів, які містяться в одиниці об'єму, залежить від роду провідника та його температури.

При дотиканні однаково нагрітих кінців двох провідників із різнорідних металів, у першому з яких кількість вільних електронів в одиниці об'єму більше ніж у другому, останні будуть дифундувати з першого провідника у другий у більшій кількості ніж зворотно. Таким чином, перший провідник буде заряджатися позитивно, а другий – негативно. Виникаюче при цьому у місці дотику (спаї) провідників електричне поле буде протидіяти цій дифузії, внаслідок чого виникне стан рухливої рівноваги, при якій між вільними кінцями вказаних провідників з'явиться деяка різниця потенціалів (термо-е.р.с.). Із збільшенням температури провідників величина цієї термо-е.р.с. також збільшуватиметься.

Крім цього, термо-е.р.с. виникає й між кінцями однорідного провідника з різними температурами. У цьому випадку до настання стану рухливої рівноваги позитивно заряджається більш нагрітий кінець провідника як маючий більшу концентрацію вільних електронів у порівнянні з кінцем менш нагрітим. Зростання різниці температур між кінцями провідника приводить до збільшення виникаючої у ньому термо-е.р.с..

Вимірювання температури за допомогою термопарі можливо лише при постійній і точно відомій температурі її вільного кінця t_0 (див. рис. 1.б у лабораторній роботі № 1), тоді величина т. е. р. с. буде прямо пропорційна температурі робочого спая: $E_{AB}(t, t_0) = f(t)$.

Для різних типів термопар (див. табл. 2.1.) ця функція має складний вид і визначається дослідним шляхом. Знаючи закон, що виражається вище згаданим рівнянням, знаходять невідому температуру, поміщаючи робочий кінець термопарі у місці вимірювання і відраховуючи за показами вторинного приладу (мілівольтметра) величину $E_{AB}(t, t_0)$.

Дані основних типів термопар

Найменування термопари	Позначення		Верхня межа температури в °С		Термо-е.р.с. при 100 °С в мВ
	Тип	Градуювання	Тривале нагрівання	Тимчасове нагрівання	
Платина – платинородій (10% Rh)	ТПП	ПП-1	1300	1600	0,643
Платинородій (30% Rh) – платинородій (6% Rh)	ТПР	ПР30/6	1600	1800	—
Хром ель – алюмель	ТХА	ХА	1000	1300	4,10
Хромель – копель	ТХК	ХК	600	800	6,95
Залізо – константан	—	З	600	800	5.15
Мідь – константан	—	М	350	500	4,16

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3

ТАРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕРМОМЕТРА ОПОРУ

МЕТА РОБОТИ: Ознайомлення з будовою пристроїв для вимірювання температур, методикою користування цими пристроями та придбання досвіду тарування (градування) електричного термометра опору.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння:

ЗНАННЯ: фізичних основ роботи електричних термометрів опору їх будову; принцип дії та галузі застосування.

ВМІННЯ: градуювати електричний термометр опору.

ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ: Вимірювальний міст, електрична плитка, посуд з водою, ртутний термометр, електричний термометр опору.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для виготовлення електричних термометрів опору використовують напівпровідникові матеріали.

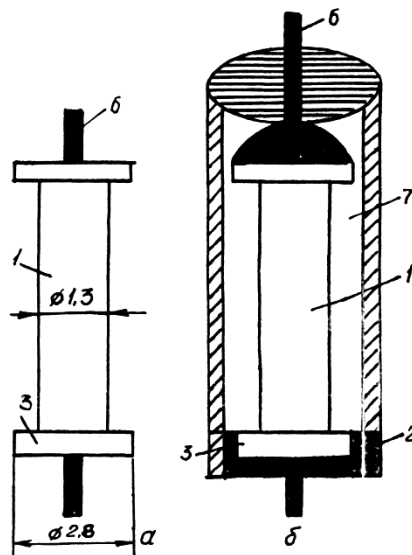


Рис. 3.4. Напівпровідниковий термометр опору

а) негерметизований; б) герметизований: 1 – напівпровідниковий елемент; 2 – олово; 3 – контактні ковпачки; 4 – захисний металічний чохол; 5 – скляна ізоляція; 6 – мідні з'єднувальні проводи; 7 – простір, заповнений емалевою фарбою.

Напівпровідникові термометри опору – терморезистори (рис. 3.4) – призначені для вимірювання температур в діапазоні $-90\dots+180$ °С. Чутливі елементи цих датчиків виготовляють із суміші двох-трьох оксидів із сполучними добавками, які подрібнюють, спікають та обпалюють, надаючи їм форму невеликих циліндриків або грудочок–намистин. У торці чутливих

елементів вплавають контакти. Терморезистори поділяють на кобальто-марганцеві (КМТ) і мідно-марганцеві (тип ММТ) і випускається в різному конструктивному оформленні.

На відміну від металевих терморезисторів (рис. 3.5, крива *TСМ*) напівпровідникові – мають від’ємний температурний коефіцієнт, тобто при нагріванні зменшують свій опір (рис. 3.5, криві *КМТ* і *ММТ*).

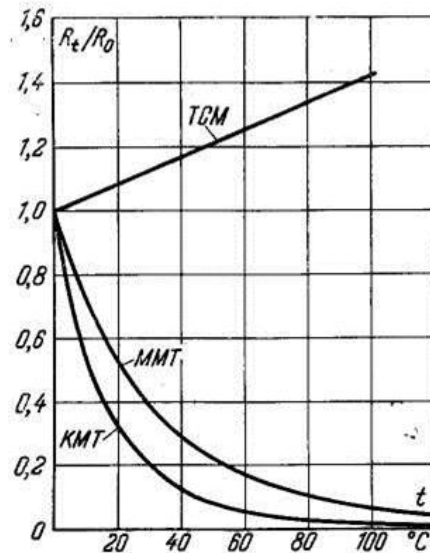


Рис. 3.5. Залежність відносного опору терморезисторів від температури.

При температурі 50°C й нижче значення їхнього температурного коефіцієнта в 5 – 10 разів більше, ніж у металів, що дає порівняно більшу зміну опору R у залежності від температури, що визначається за формулою:

$$R_t = Ae^{B/T},$$

де A і B – постійні, залежні від властивостей напівпровідникового матеріалу;

T – абсолютна температура терморезистора °K;

e – основа натуральних логарифмів.

Значення B неоднакове для чутливих елементів навіть одного й того ж типу терморезисторів, тому кожний резистор треба індивідуально градувати. При тривалій роботі на верхній межі температур спостерігається зміна опору терморезисторів, що приводить до нестабільності їхніх показів.

На практиці напівпровідникові термометри опору для вимірювання температури застосовують рідко. Найчастіше їх використовують для технологічної сигналізації, де джерело інформації повинно бути високочутливим і надто компактним. Зміна величини опору при зміні температури у термометрів опору визначається за допомогою вимірювальних мостів.

Спрощену електричну схему вимірювального моста представлено на рис.3.6. Як видно з рисунка вона складається з чотирьох плеч. Перші два плеча ВС мають постійний опір $R_1 = 510 \text{ Ом}$ і $R_2 = 10000 \text{ Ом}$; у третє плече ПС входить змінний опір $R_3 = 2,2 \text{ кОм}$; електричний термометр опору ТО підключено у четверте плече ВП. У діагональ моста включають джерело постійного струму G , напруга якого регулюється потенціометром (змінний опір $R_4 = 470 \text{ Ом}$). У коло потенціометра встановлено вмикач S' . Всі постійні опори змонтовано всередині під панеллю, а ручку змінного опору R виведено на лицьову сторону. У даній лабораторній роботі для вимірювання опору терморезистора використано реохордний міст РЗ8. Інструкцію щодо його використання дивись на панелі приладу.

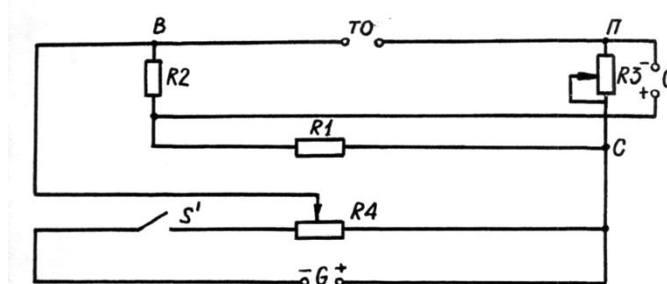


Рис. 3.6. Принципова схема вимірювального моста.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Для яких цілей використовують металеві та напівпровідникові термометри опору?
2. На чому ґрунтуються виміри температури платиновими і мідними термометрами опору?
3. Пояснити принцип роботи і будову напівпровідникових термометрів опору.
4. Накресліть принципову схему вимірювального моста та поясніть принцип вимірювання опору.

ЛІТЕРАТУРА

1. Соловцов В.К. Контрольно-измерительные приборы. М., Профтехиздат, 1963. 236 с.
2. Мурын Г.А. Теплотехнические измерения. М., «Энергия», 1968, 584 с.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Уважно прочитати інструкцію до вимірювального міста.
2. Включити вимірювальний міст через випрямляч у мережу 220 В.

3. Згідно з інструкцією провести установку «нуля» на гальванометрі.
4. Встановити перемикач меж вимірювання в положення «1000».
5. Заповнити холодною водою ємність лабораторної електроплитки і виміряти ртутним термометром її температуру.
6. Встановити перемикач гальванометра у положення "Грубо" і ручкою реохорда зрівноважити міст.
7. Зняти покази опору терморезистора зі шкали реохорда вимірювального моста, помноживши їх на 1000. Дані по температурі води та опору досліджуваного терморезистора занести до таблиці 3.3 як початкові.
8. Включити електричну плитку і нагріваючи воду до 70 – 80 °С, через кожні 5°С знімати покази величини опору терморезистора по шкалі колового реохорда вимірювального моста. Дані вимірювань заносити до таблиці 3.3.
9. Відключити електричну плитку від мережі при температурі води 70 або 80 °С. Зняти наступні покази при автоматичному підвищенні температури на декілька градусів до її максимального значення.
10. Повторити виміри зміни опору терморезистора при його охолодженні до 20 – 30 °С.
11. З метою отримання коректних результатів примусове охолодження гарячої води шляхом додавання у ємність невеликої порції холодної води починати з 60 °С.
12. Результати всіх вимірів занести до таблиці 3.3.

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

1. Вказати мету роботи, виконати рисунки будови термометрів опору. Накреслити електричну схему вимірювального моста. Побудувати графіки залежності величин опору електричного термометра від температури при нагріванні та охолодженні, тобто $R = f(t)$.
2. Зробити висновки.
3. Результати вимірювання зміни опору терморезистора при нагріванні та охолодженні занести до таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

№ з/п	Нагрівання		№ п/п	Охолодження	
	$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$		$t, ^\circ\text{C}$	$R, \text{Ом}$
1					
2					
3					
4					

5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					

ВІДОМОСТІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Вимірювання температури за допомогою електричного термометра опору ґрунтується на залежності опору тіл від температури. В більшості чистих металів із зростанням температури опір збільшується приблизно на $0,4\% \text{ K}^{-1}$, а у металів феромагнітної групи (залізо, нікель, кобальт) - на $0,65 \text{ K}^{-1}$. Деякі напівпровідникові з'єднання мають дуже великі від'ємні температурні коефіцієнти (опір зменшується із збільшенням температури).

Електричні термометри опору дозволяють вимірювати температуру з точністю до 0,02 градуси. Матеріали для термометрів опору повинні мати такі властивості: високий питомий опір, високий температурний коефіцієнт, хімічна інертність, легка технологічна відтворюваність, дешевизна, постійність фізичних властивостей у часі.

Найбільш придатними матеріалами для виготовлення електричних термометрів опору є платина (для вимірювання в інтервалі $-200... + 650^\circ\text{C}$) і мідь ($-50...+ 180^\circ\text{C}$). Питомий опір платини ρ при 0°C дорівнює $0,0981 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$. При температурі t повний опір R_t термометра визначається залежностями:

$$\text{для } t > 0^\circ\text{C}, R_t = R_0(1 + At + Bt^2),$$

$$\text{для } t < 0^\circ\text{C}, R_t = R_0[1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)],$$

де R_0 – опір при 0°C ; A, B, C - постійні (для платини марки ПЛ-2: $A = 3,96 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $B = -5,847 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$, $C = -4,22 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-4}$).

Мідь має малий питомий опір $\rho = 0,0155 \cdot 10^{-6} \text{ Ом м}$. Опір міді в інтервалі від мінус -50 до $+180^\circ\text{C}$ практично лінійно залежить від температури.

На рис. 3.1. наведено зміну в залежності від температури опору вказаних металів, подане у вигляді відношення R_t/R_0 , де R_t – опір при температурі t , а R_0 – при 0°C , прийняте за одиницю.

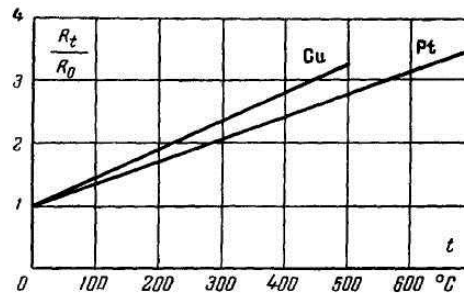


Рис. 3.1. Залежність відносного опору платини і міді від температури

Конструкція платинових термометрів опору показана на рис.3.2.

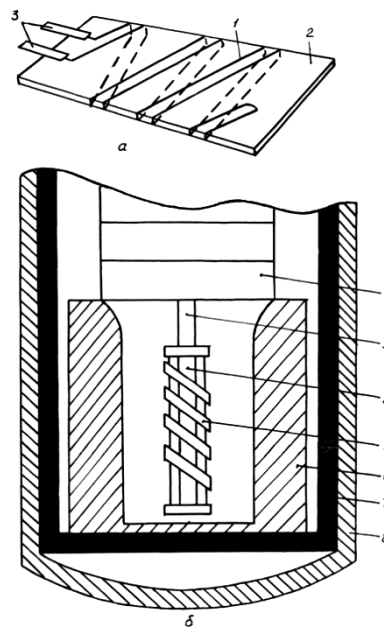


Рис. 3.2. Технічний термометр опору: 1 - платиновий дріт; 2 – слюда; 3 – затискачі; 4 – стрічка; 5 – намисто; 6 – трубка; 7 – укладка; 8 – чохол.

Неізолюваний дріт 1 діаметром 0,07 мм біфілярно намотують на слюдяну пластину 2 із зубчатыми краями. Біфілярна намотка виключає появлення індуктивного опору. Пластину з намотаним на неї платиновим дротом покривають з обох сторін слюдяними пластинами таких же розмірів. Всі три пластинки скріплюють срібною стрічкою 4 в пакет. До кожного кінця платинового дроту приварюють дріт діаметром 1 мм із срібла, який ізолюють фарфоровим намистом 5 і приєднують до затискачів на голівці термометра.

Такий чутливий елемент поміщують в тонкостінну алюмінієву трубку 6, в нижній частині якої розташовано масивну вставку 7 з плоским прорізом. Вставка покращує умови теплопередачі від трубки до чутливого елемента. Алюмінієву трубку разом з підводними дротами розміщують в зовнішній захисний чохол 8, виготовлений із сталевий труби.

Платинові технічні термометри опору (ТОП) випускаються трьох градуювань, які відрізняються величиною опору R_0 при 0°C та межами вимірювання температур (табл. 3.1).

Таблиця 3.1.

Градуювання	Опір, Ом	Межі вимірювання, $^\circ\text{C}$
20	10	0 ... + 650
21	46	- 200... + 500
22	100	- 200... + 500

В мідних термометрах опору (рис.3.3) мідний ізольований дріт діаметром 0,1 мм намотано біфілярно в кілька шарів на циліндричну пластмасову колодку 1 і покрито гліфталевим лаком. Кінці дроту припаяні до підвідних мідних дротів діаметром 1,0-1,5 мм, які з'єднано із затискачами голівки термометра. Чутливий елемент в тонкостінній металевій гільзі 2 розміщений у зовнішньому захисному чохлі довжиною від 150 до 2000 мм із зовнішнім діаметром у робочій частині 10, 14 або 21 мм.

Термометри, які призначені для виміру температури повітря при атмосферному тиску, мають перфорований зовнішній захисний чохол.

Мідні термометри випускають для вимірювання температури від -50 до $+180^\circ\text{C}$ двох типів: гр.23 - з опором 53 Ом при 0°C і гр.24 - з опором 100 Ом при 0°C .

Допустиме відхилення опору R_0 складає 0,10%. Відношення опору R_{100}/R_0 повинно бути у термометрів II класу $1,426 \pm 0,001$; у термометрів III класу $1,426 \pm 0,002$. Похибка Δt вимірювання температури за рахунок відхилення від градуюваних залежностей $R=f(t)$ не повинна перевищувати:

для термометрів II класу

$$\Delta t = \pm [0,30 + 3,5 \cdot 10^{-3} t] ^\circ\text{C}$$

для термометрів III класу

$$\Delta t = \pm [0,30 + 6,0 \cdot 10^{-3} t] ^\circ\text{C}.$$

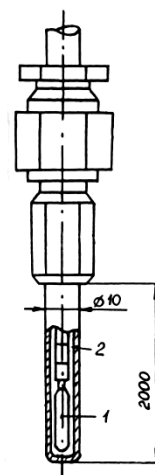
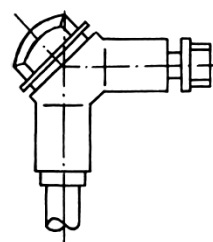


Рис. 3.3. Мідний термометр опору

1 – колодка; 2 – гільза

Дані градування приведені у табл.3.2.

Таблиця 3.2

Температура, °C	Опір для градування, Ом		Температура, °C	Опір для градування, Ом	
	гр.23	гр.24		гр.23	гр.24
- 50	42,71	79,70	+7	69,93	131,95
- 25	47,36	89,35	+100	75,58	142,60
0	53,00	100,00	+125	81,22	153,25
+ 25	58,65	110,65	+150	86,87	163,90
+ 50	64,29	121,30	+180	93,64	176,88

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

ВИВЧЕННЯ ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ БАГАТОШАРОВОЇ ПЛОСКОЇ СТІНКИ

МЕТА РОБОТИ: Навчитись дослідним шляхом визначати коефіцієнти теплопровідності різних матеріалів.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння:

ЗНАННЯ: Закону Фур'є та методики складання рівняння теплового балансу для розрахунку теплопровідності плоскої багатошарової стінки.

ВМІННЯ: Проводити розрахунки коефіцієнтів теплопровідності та термічного опору різних стінок.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ: Установка для визначення теплопровідності різних матеріалів, секундомір або ручний годинник.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Перенос енергії у вигляді теплоти від одного тіла до другого, а також між частинками даного тіла відбувається під дією різниці температур і може здійснюватись трьома способами: теплопровідністю, конвекцією й випромінюванням. Обов'язковою умовою переносу тепла теплопровідністю повинно бути дотикання між частинками тіла. У чистому вигляді теплопровідність має місце в твердих тілах і в тонких нерухомих шарах рідини або газу.

Передача тепла, обумовлена теплопровідністю, описується законом Фур'є:

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

де q – густина теплового потоку, $\text{Вт}/\text{м}^2$;

λ – коефіцієнт теплопровідності – фізичний параметр речовини, що характеризує її здатність до теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$,

$\operatorname{grad} t$ – градієнт температури – векторна величина що є мірою інтенсивності зміни температури в напрямку по нормалі до ізотермічної поверхні у бік зростання температури. $\text{К}/\text{м}$.

Вектор густини теплового потоку направлений по нормалі до ізотермічної поверхні в сторону зменшення температури. Мінус у правій частині рівняння показує, що в напрямку теплового потоку температура падає. Із закону Фур'є випливає фізичний зміст коефіцієнта теплопровідності: λ чисельно рівний густині теплового потоку при умові, що градієнт температури дорівнює одиниці. Величина коефіцієнта теплопровідності змінюється із зміною тиску і температури. Для багатьох матеріалів залежність λ від температури можна вважати лінійною: $\lambda = \lambda_0(1 +$

bt), де λ_0 – значення коефіцієнта теплопровідності при $t = 0^\circ \text{C}$; b – постійна, яка визначається дослідним шляхом.

Найкращими провідниками теплоти є метали, у яких $\lambda = 20 \div 418 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Найбільш теплопровідним металом є чисте срібло. Для більшості металів коефіцієнт теплопровідності із збільшенням температури спадає і особливо швидко при наявності різного роду домішок. У зв'язку з цим λ легованих сталей значно нижчий ніж чистого заліза.

У теплоізоляційних та будівельних матеріалів, які мають пористу структуру, λ з підвищенням температури зростає за лінійним законом від 0,2 до 3,0 $\text{Вт/(м}\cdot\text{К)}$. Це пояснюється впливом газів з малим коефіцієнтом теплопровідності $\lambda=0,005\div0,6 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, що заповнюють пори речовини, оскільки з підвищенням температури λ газів зростає. Великий вплив на коефіцієнт теплопровідності здійснює вологість речовини. Із збільшенням вологості λ підвищується.

У більшості крапельних рідин з підвищенням температури коефіцієнт теплопровідності зменшується. Винятком є вода: із збільшенням температури від 0°C до 120°C її λ підвищується, а при дальшому підвищенні температури, зменшується. Від тиску коефіцієнт теплопровідності крапельних рідин і газів практично не залежить.

Для характеристики розподілу температури тіла у часі та просторі вводять поняття температурного поля. *Температурне поле* – це сукупність значень температур у даний момент в усіх точках даного тіла. Якщо температура в будь-якій точці тіла з часом не змінюється, тобто $dt/dt = 0$, то температурне поле тіла буде стаціонарним. Кількість теплоти, передавання якої обумовлено теплопровідністю крізь плоску стінку, прямо пропорційна коефіцієнту теплопровідності стінки λ , її площі S , проміжку часу τ , різниці температур на зовнішніх поверхнях стінки $(t_1 - t_2)$ і обернено пропорційна товщині стінки δ : $Q = \lambda / \delta (t_1 - t_2) S \tau$. Відношення $\delta / \lambda = R$ – називають термічним опором шару.

Кількість теплоти, передана через багат шарову стінку, складену дотиканням декількох шарів з різних матеріалів, визначається співвідношенням:

$$Q = S \tau (t_1 - t_n) / (R_1 + R_2 + \dots + R_n), \quad (1)$$

де $R_1 + R_2 + \dots + R_n$ – термічний опір окремих шарів багат шарової плоскої стінки; n – число шарів стінки.

$$(R_1 + R_2 + \dots + R_n = \delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \dots + \delta_n / \lambda_n); \quad (2)$$

$t_1 - t_n$ – різниця температур на зовнішніх поверхнях багат шарової стінки.

Схема установки яка призначена для визначення теплопровідності стінки показана на рис. 4.1. У металічному корпусі 1 установки, покритій всередині азбестовою ізоляцією 2, поміщено електричний нагрівач 6, за допомогою якого створюється нагрівання дисків з алюмінію 5 і бетону 4. Вимірювання температури перед кожним диском і після нього здійснюється за допомогою термопар 3.

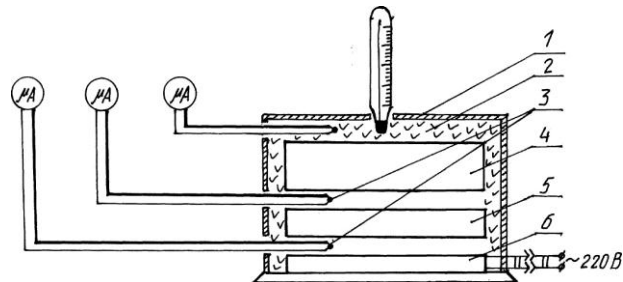


Рис. 4.1. Схема установки для визначення теплопровідності матеріалів стінки: 1 – корпус; 2 – ізоляція; 3 - термопари; 4,5 – диски(алюміній, бетон); 6 – електронагрівач.

Втрати теплоти за рахунок тепловіддачі від корпусу установки у навколишнє середовище розраховують за формулою Ньютона-Ріхмана:

$$Q_a = \alpha S_k (t_{cm.cp.} - t_{нов.}) \tau, \quad (3)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі стінок установки у навколишнє середовище, $Вт/(м^2К)$; S_k – площа корпусу установки, $м^2$; τ – час тривалості досліду, $сек.$; $t_{cm.cp.}$ – середня температура стінок установки, яка визначається за показами рідинного термометра, вставленого у верхню кришку корпусу установки; $t_{нов.}$ – температура повітря у приміщенні лабораторії.

Площа стінок корпусу, діаметр і товщина дисків приведені на панелі установки.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Що таке температурне поле? Які бувають температурні поля? Як ви розумієте стаціонарний і нестаціонарний температурний режим?
2. Що таке градієнт температури?
3. Чим пояснюють велику теплопровідність металів у порівнянні з рідинами і газами?
4. Які бувають види теплообміну? Який з видів являється домінуючим для кожної з трьох фаз?
5. Який вид теплообміну впливає, головним чином, на теплові втрати корпусу установки у навколишнє середовище?

ЛІТЕРАТУРА:

1. Швець И.Т. и др.. Теплотехніка. «Вища школа», 1976, С. 133 – 145.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Увімкнути установку в електричну мережу і виставити за вказівкою викладача положення терморегулятора на цифрах 1 ÷ 5.
2. Прогріти установку до стаціонарного режиму протягом часу τ_1 , вказаного викладачем (стрілки мікроамперметрів, до яких підключені термопари повинні показувати сталу температуру, яка не буде змінюватися у часі).
3. Зняти покази на мікроамперметрах n_1, n_2, n_3 і визначити температури на зовнішніх поверхнях стінки $t_1=n_1A_1$; $t_3=n_3A_3$ та на границі дотику алюмінієвого диска з бетонним $t_2= n_2A_2$ (A_1, A_2, A_3 – ціна поділки кожного мікроамперметра, яка вказана біля корпусу приладів).
4. Визначити тепловий потік, який виділяється нагрівачем установки із співвідношення, що $Q_n = N$, де N – потужність нагрівача, значення якої вказано на панелі установки.
5. За формулою (3) визначити теплові втрати (тепловий потік тепловіддачі) установки у навколишнє середовище Q_a . Значення коефіцієнта тепловіддачі жерстяного корпусу експериментальної установки α та його площа S_k наведені на панелі установки у $см^2$. При розрахунках площу корпусу обов'язково необхідно переводити у $м^2$. Значення часу тривалості досліду у формулу (3) не підставляють, оскільки він виключається з лівої та правої частини рівняння теплового балансу, наведеного нижче.
6. Визначити тепловий потік, який проходить крізь алюмінієвий та бетонний диски (багат шарову стінку), за формулою $Q_\lambda = Q_n - Q_a$.
7. Визначити коефіцієнт теплопровідності кожного шару стінки з рівняння теплопровідності одношарової плоскої стінки:
 1. Алюмінієвої:
$$Q_\lambda = \lambda_{Al} / \delta_{Al} (t_1 - t_2) S_{cm};$$
 2. Бетонної:
$$Q_\lambda = \lambda_{бет.} / \delta_{бет.} (t_2 - t_3) S_{cm}.$$
8. Визначити значення термічного опору кожного шару стінки за формулою:
$$R = \delta / \lambda.$$
9. Всі отримані виміри та розрахунки занести до таблиці 4.1.
10. Виконати прогрів установки до τ_2 , вказаного викладачем і повторіть п. п. 3 – 9.

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

1. Результати всіх вимірів та розрахунків занести до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

№ з/п	Вимірювана величина																		
	$\delta_{Al}, м$	$\delta_{бет}, м$	$\lambda_{Al}, Вт/(мК)$	$\lambda_{бет}, Вт/(мК)$	$t_1, ^\circ C$	$t_2, ^\circ C$	$t_3, ^\circ C$	$R_1, м^2К/Вт$	$R_2, м^2К/Вт$	$N, Вт$	$\tau, хв.$	$t_{см.сп.}, ^\circ C$	$t_{нов.}, ^\circ C$	$\alpha, Вт/(м^2К)$	$S_{ст.}, м^2$	$S_{к.}, м^2$	$Q_n, Вт$	$Q_a, Вт$	$Q_\lambda, Вт$
1																			
2																			

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5.
**ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ТЕПЛОВІДДАЧІ
ПРИ ВІЛЬНОМУ І ВИМУШЕНОМУ РУСІ ПОВІТРЯ
В ГОРИЗОНТАЛЬНІЙ ТРУБІ**

МЕТА РОБОТИ: Ознайомлення з методикою експериментального визначення коефіцієнта тепловіддачі при вільному і вимушеному русі гарячого повітря.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння:

ЗНАННЯ: Теорії конвективного теплообміну для випадків природної та вимушеної тепловіддачі.

ВМІННЯ: Визначати експериментальним шляхом коефіцієнт тепловіддачі для вільного та вимушеного руху повітря в горизонтальній трубі.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ – експериментальна установка, термометри.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ.

В теплообмінних апаратах, які застосовуються для багатьох технічних та побутових цілей перенос енергії у вигляді теплоти залежить від характеру переміщення середовища (рідкого або газоподібного теплоносія). Вільний рух теплоносія виникає за рахунок різниці температур і, як наслідок, різниці густин в окремих точках цього середовища. Звичайно швидкості переміщення середовища дуже малі.

Тепловіддача при вільному русі теплоносія має місце при нагріванні повітря приміщення опалювальними приладами. В техніці цей вид теплообміну зустрічається в парових котлах і в різних теплових установках.

Кількість теплоти, яка віддається тілом при конвективному теплообміні може бути визначена по формулі Ньютона-Ріхмана:

$$Q = \alpha S \Delta t; \quad (1)$$

де α – коефіцієнт тепловіддачі; S – площа поверхні тіла, що віддає тепло; Δt – температурний натиск (різниця між середніми температурами поверхні і теплоносія).

Коефіцієнт тепловіддачі є характеристикою інтенсивності теплопереносу і залежить від багатьох факторів: температури і шорсткості тіла, температури і швидкості руху повітря та ін.

Щоб дослідити вплив на процес конвективного теплообміну будь-якого з факторів, останні треба зберегти незмінними, що неможливо зробити з причини великої кількості змінних. Вирішити ці проблеми дозволяє теорія подібності, за допомогою якої розмірні фізичні величини об'єднуються в

безрозмірні комплекси. При цьому число комплексів менше числа величин з яких вони були складені.

Таким чином, замість встановлення залежності коефіцієнта тепловіддачі від усіх вказаних факторів визначається зв'язок між певними безрозмірними комплексами величин, характерними для даного випадку теплообміну. Ці комплекси називаються критеріями подібності.

Для випадку природної конвекції такими критеріями подібності є:

1. Критерій Нуссельта або критерій тепловіддачі:

$$Nu = (\alpha d)/\lambda, \quad (2)$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі; λ — коефіцієнт теплопровідності середовища; d — характерний геометричний розмір, у даному випадку — зовнішній діаметр труби.

Критерій Нуссельта можна розглядати як відношення густини дійсного теплового потоку, визначеного через коефіцієнт тепловіддачі α , до густини теплового потоку, який би мав місце в умовах чистої теплопровідності в прошарку товщиною δ , тобто

$$Nu = \alpha / (\lambda / \delta). \quad (3)$$

Звідси випливає, що критерій Nu характеризує збільшення інтенсивності теплообміну внаслідок конвекції порівняно з чистою теплопровідністю у нерухомому середовищі. При $Nu = 1$ процес теплообміну був би ідентичний чистій теплопровідності у прошарку товщиною δ ;

2. Критерій Грасгофа, або критерій підйомної сили:

$$Gr = (g \beta \Delta t d^3) / \nu^2, \quad (4)$$

де g — прискорення вільного падіння; β — температурний коефіцієнт об'ємного розширення газу або рідини, K^{-1} ; Δt — розрахунковий температурний натиск (різниця температур стінки і повітря); ν — кінематична в'язкість рідини, m^2/s .

Критерій Грасгофа відіграє помітну роль тільки при вільному русі середовища. Для газів підйомна сила визначається різницею температур, а для парогазової суміші ще й вологовмістом. При вимушеному турбулентному русі впливом вільного руху знехтують, внаслідок чого критерій $Gr = 0$;

3. Критерій Прандтля, або критерій фізичних властивостей рідини:

$$Pr = \nu / a; \quad (5)$$

де a — коефіцієнт температуропровідності (характеризує здатність речовини вирівнювати температуру), m^2/s .

Критерій Прандтля дорівнює відношенню двох коефіцієнтів молекулярного переносу ν/a . Перший з них характеризує перенос імпульсу

за допомогою внутрішнього тертя; другий – за допомогою теплопровідності. Таким чином, критерій Прандтля показує співвідношення між полями швидкості й температури.

Між вказаними критеріями існує однозначна залежність:

$$Nu = f(Gr; Pr). \quad (6)$$

Для ідеальних газів можна вважати $Pr = \text{const}$, оскільки Pr практично не залежить від тиску і температури і для даного газу визначається його атомністю. Тому залежність між критеріями дещо спрощується і має такий вигляд:

$$Nu = f(Gr); \quad (7)$$

4. Критерій Рейнольдса:

$$Re = (\nu d) / \nu, \quad (8)$$

де ν - середня швидкість повітря в трубі; ν - кінематична в'язкість повітря.

Критерій Рейнольдса характеризує відношення між силами інерції і тертя в потоці газу.

Якщо рух середовища створюється вимушено від вентилятора або насоса: він називається вимушеним. При вимушеному русі, як і при вільному, характеристикою інтенсивності теплообміну є коефіцієнт тепловіддачі, який можна визначити аналогічно вільному рухові, виходячи із формули Ньютона-Ріхмана, або за допомогою критеріального рівняння.

Для вимушеного руху гарячого повітря всередині горизонтальної труби критеріальне рівняння буде мати вигляд:

$$Nu = 0,021 Re_n^{0.8} Pr_n^{0.43} (Pr_n / Pr_{cm})^{0.25}. \quad (9)$$

Визначивши критерій Нуссельта, можна знайти коефіцієнт тепловіддачі α , оскільки він входить до його виразу (3):

$$\alpha = (Nu \lambda) / d, \quad (10)$$

де α — коефіцієнт тепловіддачі; λ - коефіцієнт теплопровідності середовища (повітря).

Значення λ і ν вибирають з відповідної таблиці довідника в залежності від температури повітря (табл. 5.4). Середню температуру повітря розраховують за формулою:

$$t_{cep.n} = t_{cm} + \Delta t, \quad (11)$$

де t_{cm} – температура стінки; Δt – середньологарифмічний температурний натиск. Останній параметр визначають із співвідношення:

$$\Delta t = (\Delta t' (\Delta t'' / \Delta t' - 1)) / \ln (\Delta t'' / \Delta t'), \quad (12)$$

де $\Delta t'$ – температурний натиск (різниця між температурами гарячого повітря і стінки) на одному кінці труби, а $\Delta t''$ – на іншому, причому $\Delta t' > \Delta t''$.

Критерій Прандтля $Pr = \nu/a$ у меншій мірі залежить від температури, тому, прийнявши для повітря $Pr \approx 0,7$, одержуємо:

$$Nu = 0,018 Re_n^{0,8}. \quad (13)$$

Експериментальна установка для лабораторії роботи (рис. 5.1) являє собою — пустотілу сталеву трубу 5 зовнішнім діаметром $d = 100$ мм і довжиною $l = 600$ мм. Труба розміщена горизонтально так, що повітряний простір вільно дотикається з нею. Всередині труби розміщений електричний нагрівач 4, який рівномірно виділяє тепло по всій її довжині. Кількість теплоти, яка витрачається на нагрів труби, визначається за електричною потужністю, яку споживає нагрівач $Q_k = N$. Її легко підрахувати, за показами амперметра і вольтметра $Q_k = I U$. Регулювання потужності здійснюється лабораторним автотрансформатором (ЛАТР). Для вимірювання температури поверхні використовуються рідинні термометри 2, які вставляються у спеціальні отвори труби.

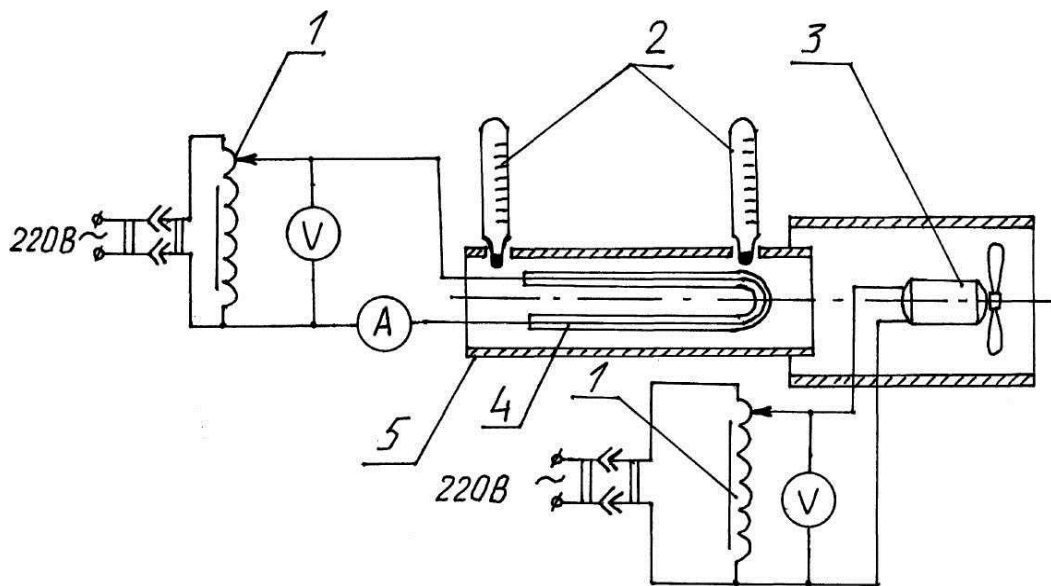


Рис. 5.1. Схема установки для визначення коефіцієнта тепловіддачі.
 1 – ЛАТРу, 2 – рідинні термометри, 3 – вентилятор, 4 – електронагрівач,
 5 – труба.

Для створення вимушеного руху повітря в трубі встановлено вентилятор 3. Регулюючи напругу ЛАТРОм можна змінювати швидкість обертання лопаток і відповідно міняти швидкість руху гарячого повітря всередині труби. Швидкість потоку повітря визначають з таблиці градування вентилятора (Табл. 5.1). Температуру оточуючого повітря вимірюють за допомогою лабораторного термометра.

Дані градування вентилятора

Напруга на вентиляторі $U, В$	85	90	95	100	105	110	115	120
Швидкість повітря $v, м/с$	0,8	1,1	1,5	2,0	2,4	2,9	3,5	4,5

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ:

1. Що розуміють під конвективним теплообміном і як він здійснюється?
2. Назвіть основні фізичні параметри рідин і газів.
3. Сформулюйте закон Ньютона-Ріхмана для умов конвективного теплообміну.
4. Що таке коефіцієнт тепловіддачі? В чому його фізичний зміст? Які фактори впливають на нього?
5. Поясніть суть теорії подібності та її значення для розрахунку конвективного теплообміну.
6. Назвіть критерії подібності, розкрийте їхній зміст та область застосування.
7. Вкажіть способи і режими руху робочого тіла в процесі конвективного теплообміну.
8. В чому суть тепловіддачі при вільному русі теплоносія?
9. В чому суть тепловіддачі при вимушеному русі теплоносія?
10. Як здійснюється тепловіддача при русі рідин і газів в трубах?
11. У чому фізичний зміст процесу променистого теплообміну?
12. Назвіть основні закони променистого теплообміну.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Швець І.Т., Кіраковський М.Ф. Загальна теплотехніка та теплові двигуни. «Вища школа», 1977, С. 56-60.
2. Швець І.Т. . и др.. Теплотехніка. «Вища школа», 1976, С. 151 – 189.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ.

Вільний рух повітря.

1. Увімкнути ЛАТР в електричну мережу і, слідкуючи за показами вольтметра, встановити вказану викладачем напругу на нагрівачі.

2. Визначити тепловий режим труби. Для цього спочатку через 10 хв., а потім через кожні 5 хв. фіксувати покази термометрів. При усталеному тепловому режимі, що характеризується незмінністю показів термометрів з часом (незалежністю температур від часу), зробити не менше трьох вимірів температури поверхні труби t_1 і t_2 через кожні 5 хв. В цьому випадку кількість теплоти, яка виділяється в нагрівнику, буде відповідати загальному тепловому потоку, який проходить через поверхню труби.

Температуру поверхні труби вимірюють за допомогою термометрів 2 (див. рис. 5.1). Результати вимірювань занести до табл. 5.2.

3. Розрахувати кількість теплоти, яка виділяється нагрівачем за одиницю часу (тепловий потік). В даній роботі кількістю теплоти, яку віддає поверхня труби шляхом променевого теплообміну і в результаті втрат крізь торець труби, можна знехтувати. Таким чином, за повну кількість теплоти Q_n , яка виділяється поверхнею труби, приймають теплоту за рахунок конвективного теплообміну Q_k .

4. Визначити середню температуру стінки:

$$t_{cm} = (t_1 + t_2) / 2,$$

де t_1 і t_2 – покази термометрів, в $^{\circ}\text{C}$;

5. Розрахувати коефіцієнт тепловіддачі горизонтальної труби при вільному русі повітря: $\alpha = Q_k / S(t_{cm} - t_n)$, де $S = \pi dl$ – площа поверхні тепловіддачі труби, m^2 ; t_n температура повітря в приміщенні.

6. За формулами (3) і (4) розрахувати критерії Nu та Gr . Значення критерія Pr_n та кінематичної в'язкості повітря ν взяти з таблиці 5.4 для умов, що відповідають температурі повітря у приміщенні лабораторії. Коефіцієнт $\beta = 1 / (273 + t_{cm})$.

7. Результати розрахунків занести до таблиці 5.2.

Вимушений рух повітря.

1. Не виключаючи електронагрівач увімкнути ЛАТР і живлення вентилятора і встановити, слідкуючи за вольтметром, вказану викладачем напругу.

2. Приблизно через 10 хв., коли відбудеться тепла стабілізація системи, тобто покази термометрів, які знаходяться на протилежних кінцях труби не перестануть змінюватись в часі, виміряти значення t_1 і t_2 та занести їх до таблиці 5.3.

3. З таблиці 5.1 (дані градування вентилятора) знайти швидкість повітряного потоку.
4. За допомогою аудиторного термометра виміряти температуру навколишнього середовища.
5. Виміри провести при трьох значеннях напруги на ЛАТРі (тобто при трьох значеннях швидкості повітряного потоку).
6. Результати вимірювань занести до таблицю 5.3.
7. За формулою (8) визначити критерій Re (значення v беруть з таблиці 5.4 для середньої температури повітря, яка знаходиться по формулі (11)).
8. Знайти з таблиці 5.4 критерій Pr .
9. Розрахувати критерій Nu за наближеною формулою (13).
10. Визначити коефіцієнт тепловіддачі α за формулою (10).
11. Результати розрахунків занести до таблиці 5.3.

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

1. Привести результати вимірів та розрахунків теплотехнічних параметрів вільної тепловіддачі у таблиці 5.2.

Таблиця 5.2.

Дослідження вільної тепловіддачі

№ з/п	Вимірювана величина						Розрахункові величини						
	t_1 °C	t_2 °C	t_{cm} °C	t_n °C	I A	U B	Q_{κ} Bm	α Bm/(m ² K)	Pr_n	Nu	Gr	β K ⁻¹	ν , m ² /c 10 ⁻⁶

2. Привести результати вимірів та розрахунків теплотехнічних параметрів вимушеної тепловіддачі у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3

Дослідження вимушеної тепловіддачі

№ з/п	Вимірювана величина						Розрахункові величини							
	$t_1,$ °C	$t_2,$ °C	$t_{cm},$ °C	$t_n,$ °C	$t_{c.n.},$ °C	$U,$ B	$v,$ м/с	Re	α Вт/(м ² К)	Pr_n	Nu	Gr	$\beta,$ К ⁻¹	$\nu,$ м ² /с, 10 ⁻⁶

ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СУХОГО ПОВІТРЯ

при $P_n = 760$ мм рт.ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p,$ кДж/(кгК)	$\lambda, 10^{-2}$ Вт/(м·К)	$a, 10^{-6}$ м ² /с	$\mu, 10^{-6}$ Н·с/м ²	$\nu, 10^{-6}$ м ² /с	Pr
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,96	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,9728	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВОДЯНОЇ ПАРИ ЗА
ДОПОМОГОЮ ДІАГРАМИ ТА ТАБЛИЦЬ**

МЕТА РОБОТИ: Ознайомлення з діаграмою яка полегшує та прискорює розрахунок теплових машин, набуття досвіду використання таблиць і теплової діаграми $i-S$ для розв'язку задач з аналізу термодинамічних процесів водяної пари.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння:

ЗНАННЯ: Основних термодинамічних процесів водяної пари та методів дослідження параметрів водяної пари за допомогою $i-S$ діаграми.

ВМІННЯ: Аналізувати термодинамічні цикли паросилових енергетичних установок. Визначати параметри водяної пари за допомогою діаграми і таблиць.

ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ ТА ІНСТРУМЕНТИ:

Лінійка, олівець, таблиці сухої і насиченої водяної пари, $i-s$ діаграма.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для проведення термодинамічного аналізу різних теплових процесів необхідно знати властивості конкретних робочих тіл.

Робочим тілом називають середовище, за допомогою якого здійснюється взаємне перетворення теплоти та роботи. Найчастіше у якості робочого тіла в теплових машинах використовуються газоподібні продукти згоряння палив або водяна пара. Термодинамічні властивості найбільш поширених в техніці робочих середовищ зараз достатньо широко вивчені, для них розроблені спеціальні таблиці. При термодинамічному аналізі використовують також і термодинамічні діаграми, які забезпечують не тільки кількісні розрахунки, а й уявлення процесів і циклів, які вивчаються з метою встановлення ефективності теплового двигуна.

За допомогою діаграм і таблиць знаходять значення ентальпії, ентропії, ступеня сухості пари, термічний $ККД$ циклів й інші важливі характеристики теплових машин та їхніх робочих тіл. На практиці найчастіше використовуються діаграми $T-S$ (температура - ентропія), $i-S$ (ентальпія - ентропія). Одна з них – $i-S$ діаграма зображена на рисунку 6.1. По осі абсцис відкладають значення питомої ентропії S , Дж/кг·К, а по осі ординат – питомої ентальпії i , Дж/кг.

Е н т р о п і я являє собою однорідну функцію стану тіла і визначається як:

$$s = s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T} , \quad (1)$$

діаграмі це буде зображено довжиною відрізка $i_2 - i_1$ (див. рис 6.2 а) На діаграмі $i-S$ нанесені сітки ізотерм $T(S;i)=const$, ізобар $p(S;i)=const$, ізохор $v(S;i)=const$, криві постійної сухості пари $x(S;i)=const$ (криві $x=0,8, x=0,6, \dots x=0,5$). На діаграмі нанесена також погранична крива $x=1$, яка розмежовує область двофазного стану (знизу під кривою) від області однофазного стану (зверху над кривою).

Ізотерми водяної пари в області газоподібного стану являють собою неперервні криві, які поблизу кривої насичення (погранична крива) мають додатній кутовий коефіцієнт і повернуті опуклістю вгору. Чим більша температура T , тим вище знаходиться відповідна ізотерма. В області двофазного стану речовини ізотерми співпадають з ізобарами та переходять в прямі лінії з додатнім кутовим коефіцієнтом.

Ізобари мають вид нерозривних кривих, які не перетинаються з додатнім кутовим коефіцієнтом. Ізобари, які відповідають великому тиску знаходяться вище ізобар меншого тиску.

Ізохори зображаються нерозривними кривими з додатнім кутовим коефіцієнтом. Чим більший питомий об'єм речовини, тим нижче знаходиться ізохора.

Лінії постійної сухості пари знаходяться нижче пограничної кривої насичення і характеризують вміст пари в області двофазного стану речовини: вода – пара. Вміст сухої насиченої пари характеризується ступінню сухості x :

$$x = M_p / (M_p + M_n) ,$$

де M_n і M_p – вага пари та рідини.

На рисунку 6.2 наведено основні термодинамічні процеси водяної пари, які зображено на $i-S$ діаграмі. Для визначення ентальпії та ентропії необхідно знайти точку на координатній площині $i-S$ діаграми. Вона знаходиться на перетині двох кривих із тих сімейств, які нанесені на координатну площину ($T=const, p=const, v=const, x=const$). Припустимо, що необхідно визначити значення ентальпії та ентропії пари тиску p і температурі T_2 . для цього знаходять точку 2 (мал. 6.2 а) на перетині відповідної ізотерми t_2 і ізобари p . Проекції точки 2 на координатні вісі X і Y дадуть шукане значення ентропії S_2 та ентальпії i_2 .

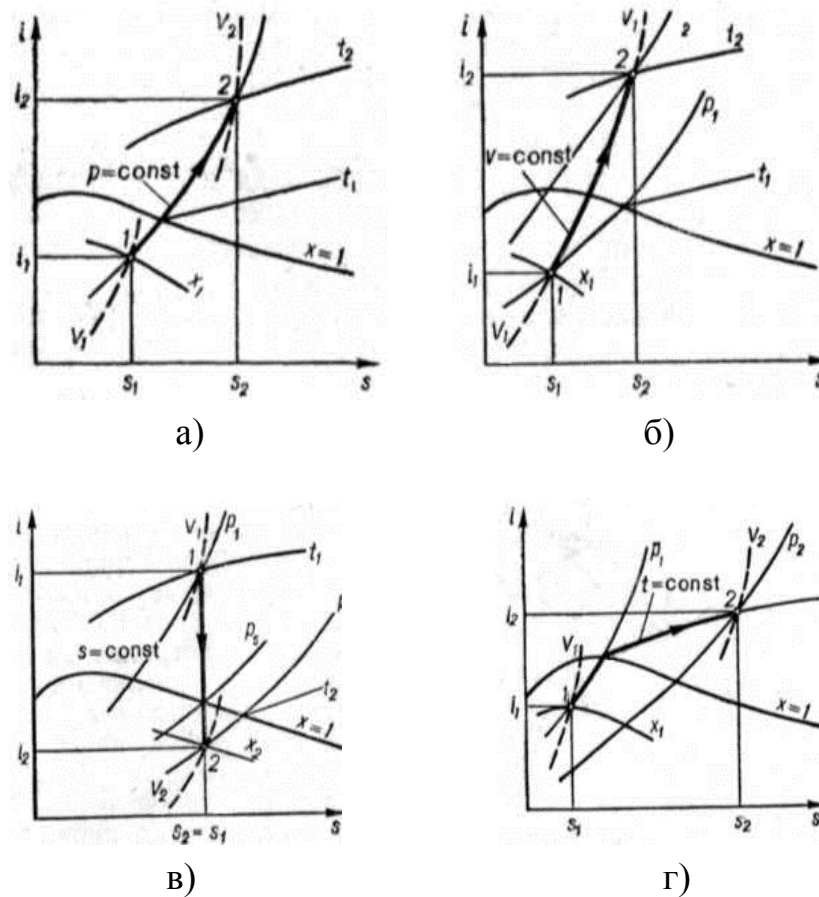


Рис. 6.2. Основні процеси з водяною парою на i - S діаграмі:
 а) – ізобарний; б) – ізохорний; в) – адіабатний; г) – ізотермічний.

При зміні стану пари треба враховувати характер процесу. Так при ізотермічному процесі точку потрібно переміщувати вздовж ізотерми до перетину з відповідною ізобарою, при ізобаричному – відповідно навпаки. За діаграмою зручно визначати кількість теплоти Q , отриману робочим тілом масою 1 кг. при ізобаричному процесі (вона дорівнює різниці питомих ентальпій в кінцевому і початковому станах $i_2 - i_1$).

Процес адіабатичного розширення пари буде виглядати як ізентропа (рис. 6.2 в). Довжина відрізка 1-2 ($i_1 - i_2$) буде дорівнювати роботі водяної пари.

Робочі цикли багатьох теплових двигунів мають ізобаричні ділянки, тому i - s діаграма широко застосовується для аналізу цих циклів.

На практиці часто зустрічається так зване дроселювання, яке виникає при проходженні газів або пари через клапан з малим прохідним перерізом або крізь не повністю відкритий вентиль. Дроселювання є незворотнім процесом, в якому тиск при проходженні газів крізь отвір що звужується зменшується без здійснення зовнішньої роботи, при цьому завжди відбувається збільшення ентропії і зменшення працездатності робочого тіла. Ентальпія для початкових і кінцевих значень залишається

однаковою, а температура може збільшуватися, зменшуватися або залишатися постійною.

При адіабатичному дроселюванні ентальпія тіла зменшується. Інтегральний ефект дроселювання визначається як $\Delta T = T_2 - T_1$, значення ΔT може мати як додатний так і від'ємний знак.

Діаграма $i-s$ зручна також для аналізу фазового стану речовини. Лінія насичення $x=1$ відокремлює область двофазного стану речовини (вода – пара) в нижній частині діаграми від області однофазного стану (газ, тобто суха насичена перегріта пара) в її верхній частині.

Перегрітою називають пару, яка має при даному тиску більш високу температуру ніж суха насичена пара. Під теплою перегріву розуміють ту кількість теплоти, яку необхідно витратити на перегрів сухої пари масою 1 кг. до необхідної температури при постійному тиску. Теплою перегріву можна визначити за формулою:

$$Q_n = \int_m^t C_p dt,$$

або $Q_n = C_{pn}(t - t_n)$, де C_p – теплоємність перегрітої пари при постійному тиску; C_{pn} – середня теплоємність перегрітої пари в інтервалі температур від t_n до t .

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ

1. Які методи застосовуються для дослідження термодинамічних процесів водяної пари?
2. Як зображаються основні процеси водяної пари на $i-s$ діаграмі?
3. Як визначити зміну внутрішньої енергії, кількість підведеної теплоти і зовнішню роботу для ізотермічного процесу?
4. Привести рівняння, якими визначають кількість підведеної теплоти, зміну внутрішньої енергії, роботу, ступінь сухості водяної пари при ізохорному процесі.
5. За якими рівняннями визначають зміну внутрішньої енергії, зовнішню роботу, кількість підведеної теплоти і ступінь сухості водяної пари при ізотермічному процесі?
6. Дайте визначення процесу дроселювання і поясніть де він зустрічається.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Швець И.Т. и др. Теплотехніка. «Вища школа», 1976, С. 58 – 68; С. 113.
2. Теплотехника: Учеб. Для вузов / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др.; Под ред. А.П. Баскакова. – 2-е узд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 34 – 39.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

Отримавши від викладача індивідуальне завдання (один з варіантів умови восьми задач), заповнити таблицю 6.1 і приступити до розв'язку задач сформульованих нижче. При цьому необхідно дотримуватися послідовності дій наведених у розділі «Звіт до роботи».

Задача 1. Водяна пара масою m кг поступає в паросилову установку при тиску p_1 і температурі t_1 . При здійсненні механічної роботи відбувається адіабатичне розширення пари до тиску p_2 .

Визначити:

- 1) значення ентальпії і ентропії;
- 2) теплоперепад;
- 3) термічний ККД установки;
- 4) ступінь перегріву пари;
- 5) ступінь сухості пари.

Задача 2. Водяна пара з початковим тиском p_1 і температурою t_1 дроселюється до тиску p_2 . Визначити дросельний ефект і температуру пари після дроселювання.

Задача 3. Визначити внутрішню енергію, ентальпію, ентропію, питомий об'єм водяної пари масою m при тиску p_1 і ступені сухості x_1 . Знайти масу води та насиченої пари.

Задача 4. Визначити кількість теплоти, яку потрібно передати водяній парі масою m кг., що займає питомий об'єм v_1 при тиску p_1 , щоб при цьому ж питомому об'ємі збільшити тиск до p_2 . Визначити також кінцеву температуру пари, ступінь сухості і зміну ентропії.

Задача 5. Після ізотермічного розширення при тиску p_1 пара масою m кг, сухістю x_1 переходить в сухий насичений стан. Визначити кількість теплоти, переданої парі, роботу нею виконану та зміну внутрішньої енергії.

Задача 6. Водяна пара масою m кг, що займає питомий об'єм v_1 , при тиску p_1 розширюється адіабатично до тиску p_2 . Визначити кінцевий об'єм пари, її сухість і виконану нею роботу.

Задача 7. Визначити кількість теплоти, яку необхідно витратити для одержання перегрітої пари питомим об'ємом v_1 , при тиску p_1 і температурі t_1 з води, яка має температуру t_2 . Яка буде при цьому ентропія пари?

Задача 8. Перегріта пара масою m кг, температурою t_1 розширюється адіабатично від початкового значення тиску p_1 до значення тиску p_2 . Знайти для кінцевого стану пари сухість і температуру, визначити падіння ентальпії при переході пари з початкового стану в кінцевий стан. Знайти також і температуру у той момент, коли вона в процесі розширення стає сухою, насиченою.

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

1. Заповнити таблицю 6.1 даними індивідуального завдання згідно варіанту виданого викладачем.

2. Виконати стислий запис умови кожної задачі, визначивши початкову та кінцеву точки процесу, зазначивши у символічній формі дані, які необхідно визначити.

Накреслити схему розв'язку кожної задачі на умовній i - S діаграмі (дивись приклад розв'язку задачі на с. 67 – 68 у підручнику И.Т. Швеця). З таблиці I – 4, підібрати співвідношення для розрахунків термодинамічних параметрів водяної пари до кожної задачі.

Варіант № Розрахункові дані розв'язаних задач

Таблиця 6.1

№ Задачі	Маса, кг	Процес	Початкові параметри					Кінцеві параметри					Теплове репед, ΔS	А, Ро бо та	Q, Кільк сть тепло ти	Примі тки		
			p_1 , МПа	t_1 , °C	v_1 , м³/кг	i_1 , кДжс	s_1 , кДжс	x_1 , %	p_2 , МПа	t_2 , °C	v_2 , м³/кг	i_2 , кДжс				s_2 , кДжс	x_2 , %	
1																		
2																		
3																		
4																		
5																		
6																		
7																		
8																		

ВІДОМОСТІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. За інструкцією до лабораторної роботи та рекомендованою літературою ознайомитися з теорією термодинамічних процесів водяної пари.

2. Ознайомитися з прикладами розв'язування задач, наведеними у рекомендованій літературі [1] (С. 67–68; С. 113). Повторити за аналогією розв'язок задач на реальній i - S діаграмі.

3. Законспектувати розрахункові співвідношення для визначення термодинамічних параметрів водяної пари для різних процесів з підручника [1] (таблиця I – 4 , С.67).

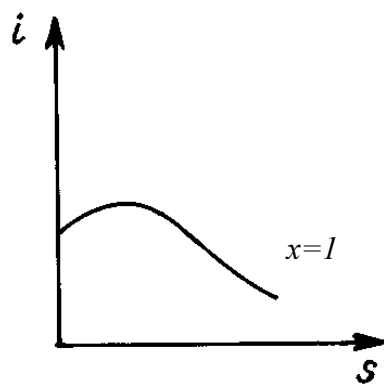
4. Коротко письмово відповісти на контрольні питання.

5. Скориставшись реальною i - S діаграмою знайти на ній всі початкові та кінцеві параметри водяної пари, відповідно до моделей розв'язків, виконаних на умовних діаграмах (п.2). Підставити знайдені величини у розрахункові співвідношення та визначити значення термодинамічних параметрів, відповідно до умови кожної задачі.

Занести всі отримані дані до таблиці 6.1.

Задача №1
Дано:

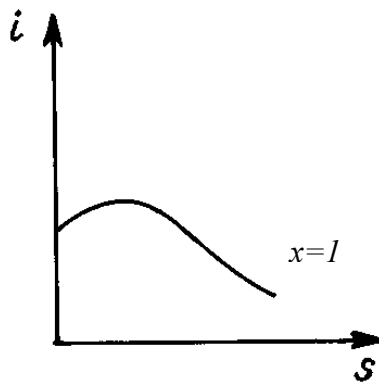
Визначити:



Розрахункові співвідношення

Задача №2
Дано:

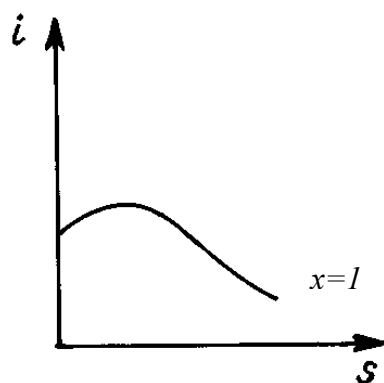
Визначити:



Розрахункові співвідношення

Задача №3
Дано:

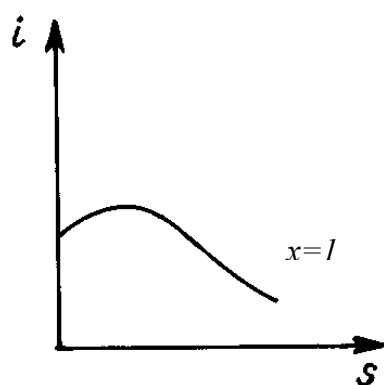
Визначити:



Розрахункові співвідношення

Задача №4
Дано:

Визначити:

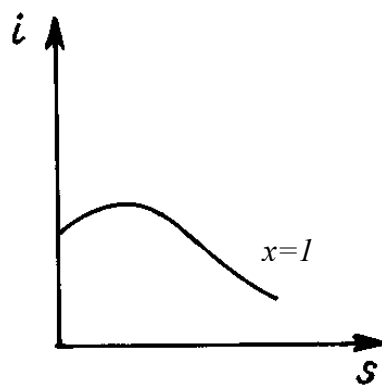


Розрахункові співвідношення

Задача №5

Дано:

Визначити:

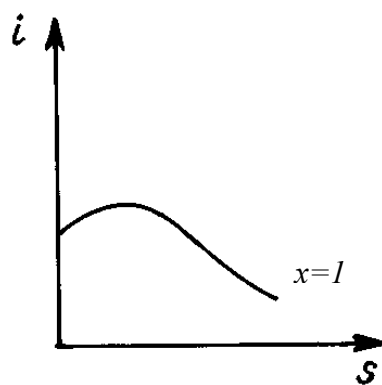


Розрахункові співвідношення

Задача №6

Дано:

Визначити:

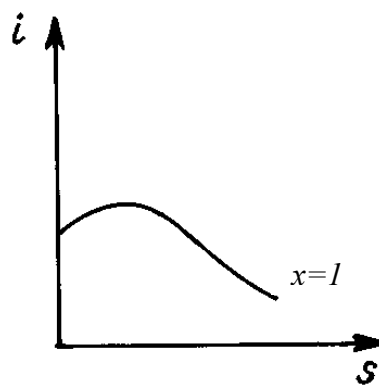


Розрахункові співвідношення

Задача №7

Дано:

Визначити:

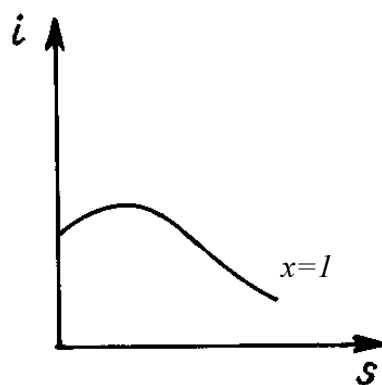


Розрахункові співвідношення

Задача №8

Дано:

Визначити:



Розрахункові співвідношення

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №7
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ В
ТЕПЛООБМІННИКУ «ТРУБА В ТРУБІ»**

МЕТА РОБОТИ: Ознайомлення з методами та засобами визначення коефіцієнта теплопередачі в теплообмінному апараті і коефіцієнтів тепловіддачі. Визначення витрат тепла у навколишнє середовище. Дослідження впливу лінійної швидкості теплоносія на інтенсивність теплопередачі.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння

ЗНАННЯ: закономірностей теплообміну у теплообмінниках типу «труба в трубі»; впливу режиму руху рідини на коефіцієнти тепловіддачі й теплопередачі.

ВМІННЯ: проводити елементарні розрахунки теплообмінних апаратів рекуперативного типу; експериментально визначати коефіцієнти теплопередачі; застосовувати теорію подібності для розрахунків коефіцієнтів конвективного теплообміну.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ: лабораторний стенд, оснащений контрольно-вимірювальними приладами.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Теплообмінники - це пристрої, в яких енергія у формі теплоти переходить від одного рідкого, або газоподібного середовища до іншого. Теплообмін між теплоносіями один з найважливіших процесів, який використовується у техніці.

За принципом дії теплообмінні апарати поділяють на рекуперативні, регенеративні та змішувачі.

Рекуперативні теплообмінники - це пристрої, в яких теплота від гарячого до холодного теплоносія передається через розділяючу їх тверду стінку. В залежності від напрямку руху теплоносіїв рекуперативні теплообмінні апарати класифікуються на прямоточні (теплоносії рухаються в одному напрямку), проти точні (рух теплоносіїв протилежний), з перехресним і змішаним током.

Теплообмін в рекуператорах відбувається за рахунок конвекції і теплопровідності стінки.

Регенератори - такі теплообмінні апарати, в яких одна і та ж поверхня нагріву через певні проміжки часу омивається то гарячим, то холодним теплоносієм.

В апаратах змішувачах теплопередача від гарячого до холодного теплоносія відбувається при їх безпосередньому змішуванні.

1.1. Розглянемо процес теплопередачі в рекуперативному теплообміннику (рис.7.1.) для умов стаціонарності температури обох теплоносіїв, а також вільного конвективного теплообміну.

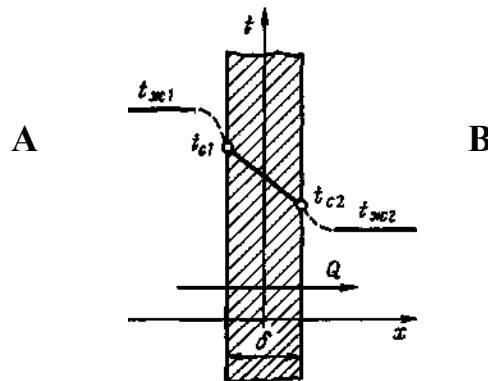


Рис. 7.1. Розподіл температури при передаванні теплоти між двома теплоносіями скрізь плоску стінку. **А**- гарячий (який охолоджується) теплоносіїв. **В** – холодний (який нагрівається) теплоносіїв.

Спочатку теплота передається від гарячого теплоносія $t_{ж1}$ до однієї з поверхонь стінки шляхом конвективного теплообміну, що описується рівняннями Ньютона-Ріхмана:

$$Q_{\alpha_1} = \alpha_1 \times F \times (t_1 - t_{c1}), \quad \text{Вт} \quad (1)$$

Далі теплота шляхом теплопровідності передається від однієї поверхні стінки t_{c1} , до іншої t_{c2} . Цей процес описується рівнянням Фур'є:

$$Q_{\lambda} = \lambda / \delta \times F \times (t_{c1} - t_{c2}), \quad \text{Вт} \quad (2)$$

Завершується процес теплопередачі знов конвективним теплообміном між другою поверхнею стінки t_{c2} і холодним теплоносієм $t_{ж2}$:

$$Q_{\alpha_2} = \alpha_2 \times F \times (t_{c2} - t_2), \quad \text{Вт} \quad (3)$$

При стаціонарному режимі тепловий потік Q у всіх трьох процесах однаковий, тому:

$$Q_k = \alpha_1 \times F \times (t_1 - t_{c1}) = \lambda / \delta \times F \times (t_{c1} - t_{c2}) = \alpha_2 \times F \times (t_{c2} - t_2), \quad (4)$$

α_1 і α_2 (Вт/(м²К)) – коефіцієнти тепловіддачі, величина яких характеризує інтенсивність конвективного теплообміну між відповідними теплоносіями і поверхнями стінки F (м²). Величину F називають ще поверхнею теплопередачі.

Шляхом нескладних перетворень з рівняння (4) можна отримати:

$$Q_k = [(t_1 - t_2) / ((1/\alpha_1) + (\lambda/\delta) + (1/\alpha_2))] \times F, \quad (5)$$

Якщо прийняти

$$1 / ((1/\alpha_1) + (\lambda/\delta) + (1/\alpha_2)) = k, \quad (\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})) \quad (6)$$

де k коефіцієнт теплопередачі, то тепловий потік

$$Q_k = k \times F \times (t_1 - t_2), \quad \text{Вт} \quad (7)$$

Вираз (7) є рівнянням теплопередачі для плоскої одношарової стінки при постійних температурах теплоносіїв.

Для багатошарової стінки:

$$k = 1 / \left((1/\alpha_1) + \left(\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i \right) + (1/\alpha_2) \right), \quad (8)$$

$\sum_{i=1}^n \delta_i / \lambda_i$ - сума термічних опорів теплопровідності окремих шарів стінки.

Рівняння (8) справедливе не тільки для плоских, але і для циліндричних стінок (труби), якщо відношення зовнішнього та внутрішнього діаметрів труби теплообмінного апарата $d_{\text{зов}}/d_{\text{вн}} \leq 2$.

Якщо $d_{\text{зов}}/d_{\text{вн}} \geq 2$, коефіцієнт теплопередачі для циліндричних стінок розраховується за формулою:

$$k = \pi / \left[(1/\alpha_1 \times d_1) + \left(\sum_{i=1}^n (1/2\lambda_i) \times \ln(d_{i+1}/d_i) \right) + (1/\alpha_2 \times d_{n+1}) \right] \quad (8a)$$

d_1, d_{n+1} - внутрішні та зовнішні діаметри труби відповідно, m ; i - номер шару, n - кількість шарів; α_1 - коефіцієнт тепловіддачі від гарячого теплоносія до внутрішньої поверхні труби, (Вт/(м²·К)) ; α_2 - коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні до холодного теплоносія, (Вт/(м²·К)).

В реальних теплообмінниках температура теплоносіїв t_1 і t_2 не постійні, а змінюються по довжині теплообмінного апарата. Тому при розрахунках необхідно використовувати середньо-інтегральну по довжині теплообмінника різницю температур теплоносіїв $\Delta t_{\text{сеп}}$:

$$Q_k = kF \times \Delta t_{\text{сеп}}. \quad (9)$$

Величина $\Delta t_{\text{сеп}}$ залежить від того, в якому напрямку вздовж поверхні F протікають відносно один одного теплоносії, що приймають участь у теплообміні. Для теплообмінних апаратів з найбільш поширеною схемою руху теплоносіїв (прямо - і протиточно) $\Delta t_{\text{сеп}}$ визначається за формулою середньо-логарифмічного температурного натиску:

$$\Delta t_{\text{сеп}} = (\Delta t_{\text{в}} - \Delta t_{\text{м}}) / (\ln \Delta t_{\text{в}} / \Delta t_{\text{м}}), \quad (10)$$

де $\Delta t_{\text{в}} = t'_1 - t_2''$ (11) - різниця температур на вході гарячого і виході холодного теплоносія (для протитоку), а $\Delta t_{\text{м}} = t''_1 - t_2'$ (12) - різниця температур на виході гарячого і вході холодного теплоносія (також для протитоку).

Якщо $\Delta t_g / \Delta t_m < 2$, то для знаходження температурного натиску користуються формулою середньоарифметичного температурного натиску:

$$\Delta t_{ср} = (\Delta t_g + \Delta t_m) / 2 \quad (13)$$

Суттєвий вплив на інтенсивність теплопередачі чинить швидкість руху рідини або газу. Збільшення швидкості спричинює підвищення турбулентності руху потоку теплоносія і перешкоджає утворюванню накипу, що сприяє збільшенню коефіцієнта теплопередачі. Турбулентність полегшує також конвективний перенос теплоти.

1.2. При вимушеному гідродинамічному режимі рідини, яка рухається по прямим каналам і трубах коефіцієнти тепловіддачі α_1 і α_2 визначаються через відповідні критерії Нуссельта (Nu_1 і Nu_2):

$$\alpha_1 = Nu_1 \times (\lambda_1 / d_1), \quad (14a)$$

$$\alpha_2 = Nu_2 \times (\lambda_2 / d_2), \quad (14б)$$

де λ_1 і λ_2 – коефіцієнти теплопровідності гарячого і холодного теплоносіїв ($Вт/(м К)$), d_1 і d_2 - діаметри трубопроводів, м.

Критерії тепловіддачі Нуссельта визначають через наступні критеріальні рівняння:

а) при ламінарному режимі ($10 < Re < 2300$)

$$Nu = 0,17 Re^{0,33} \cdot Pr_{pid}^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot (Pr_{pid} / Pr_{cm})^{0,25}; \quad (15)$$

б) при перехідному режимі ($2300 < Re < 10000$)

$$Nu = 0,008 Re^{0,9} \cdot Pr_{pid}^{0,43}; \quad (16)$$

в) при турбулентному режимі ($Re > 10000$)

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} \cdot Pr_{pid}^{0,43} \cdot (Pr_{pid} / Pr_{cm})^{0,25} \cdot \varepsilon_\lambda; \quad (17)$$

де ε_λ - поправочний коефіцієнт, враховуючий вплив відношення довжини труби до її діаметру ℓ / d на коефіцієнт тепловіддачі (при $\ell / d \geq 50$, $\varepsilon_\lambda = 1$); Re – критерій Рейнольдса; Pr_{pid} , Pr_{cm} – критерії Прандтля, відповідно розраховуються по температурі рідини і стінки. Коли температури рідини і стінки не сильно відрізняються відношення $Pr_{pid} / Pr_{cm} = 1$

Критерій Рейнольдса і Прандтля розраховуються по формулам:

$$Re = (v \times d \times \rho) / \mu, \quad (18)$$

$$Pr = (\mu \times C_p) / \lambda, \quad (19)$$

де v - швидкість руху теплоносія, м/с;

d - діаметр трубопроводу, m ;

ρ – густина теплоносія, kg/m^3 ;

μ – динамічна в'язкість теплоносія, $Pa \cdot s$;

C_p - питома теплоємність теплоносія при постійному тиску, $J/(kg \cdot K)$;

λ - коефіцієнт теплопровідності теплоносія, $W/(m \cdot K)$.

У рівняння (15) входить ще визначальний критерій Грасгофа (Gr), враховуючий теплообмін при вільній конвекції теплоносія, який розраховується по формулі:

$$Gr = g \times d^3 \beta \times \Delta t / \nu^2, \quad (20)$$

де β - коефіцієнт об'ємного розширення теплоносія, K^{-1} ;

Δt - різниця температур між поверхнею і теплоносієм, K ;

g - прискорення вільного падіння, m/s^2 ;

ν - кінематична в'язкість теплоносія, m^2/s .

1.3. Окрім рівняння теплопередачі (9), загальним рівнянням при розрахунках теплообмінника любого типу є рівняння теплового балансу, яке відображає закон збереження теплової енергії для явища теплопередачі.

Тепловий потік Q_1 , що віддається гарячим теплоносієм при його охолодженні від температури t_1' до t_1'' дорівнює:

$$Q_1 = C_p \times \rho_1 \times V_1 \times (t_1' - t_1''), \quad (21)$$

де V_1 - об'ємні витрати теплоносія, m^3/s .

Декілька відсотків тепла (1-12%) від Q_1 витрачається у навколишнє середовище крізь стінки теплообмінника, а основна частина $Q_2 = \eta_k Q_1$ йде на підігрів холодного теплоносія (η_k – К.К.Д. теплообмінника, що враховує втрати тепла):

$$Q_2 = C_{p2} \times \rho_2 \times V_2 \times (t_2'' - t_2') = \eta_k \cdot Q_1 = \eta_k \times C_{p1} \times \rho_1 \times V_1 \times (t_1' - t_1'') \quad (22)$$

Рівняння теплового балансу (22) дозволяє знайти один з невідомих параметрів: або витрати (V_1 чи V_2) одного з теплоносіїв, або одну з температур. Всі інші параметри повинні бути відомими.

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Теплообмінник "труба в трубі" (принципова схема зображена на рис.7.2.) складається з двох розташованих паралельно елементів А і В. Кожний елемент складається з двох коаксіальних труб: зовнішньої та внутрішньої, які з'єднані паралельно. Загальна робоча довжина теплообмінника $\ell = 3,2$ м, площа поверхні теплообміну $F = 0,38$ м², діаметр внутрішньої труби $d_2 = 40$ мм, зовнішньої – $d_1 = 54$ мм.

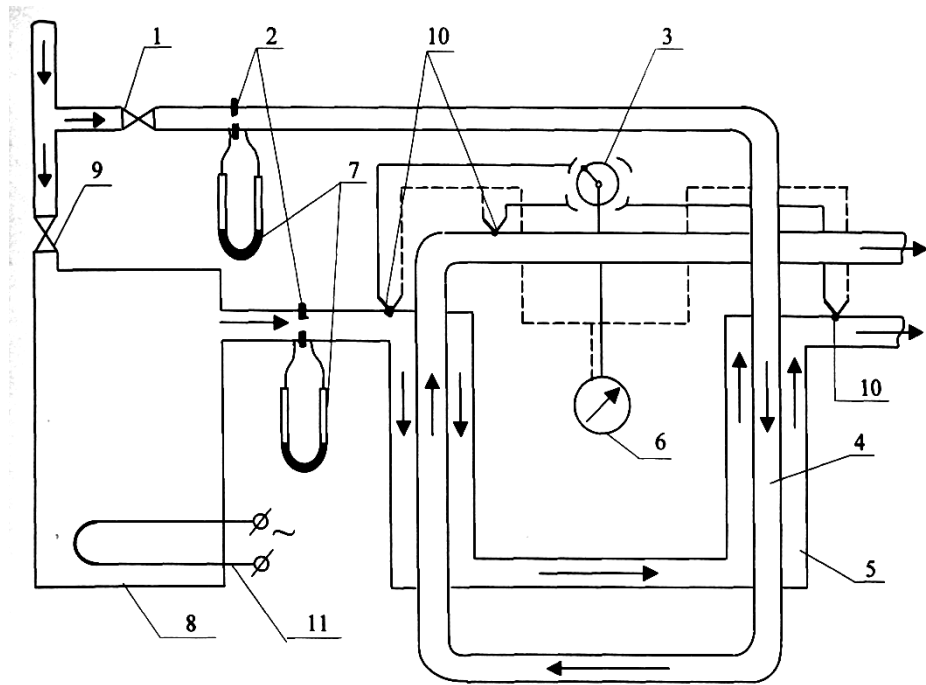


Рис. 7.2. Схема теплообмінника «Труба в трубі»

- 1 – вентиль, 2 – витратомірні діафрагми, 3 – перемикач термопар,
 4 – внутрішня труба, 5 – зовнішня труба, 6 – мілівольтметр,
 7 – диференційні манометри, 8 – ємність (бак для води), 9 – вентиль,
 10 – термопари, 11 – електронагрівач.

Для нагрівання води, яка протікає по зовнішній трубі, використовують ємність 8 з розташованими в ній нагрівними елементами. Об'ємні витрати гарячої і холодної води вимірюються за допомогою витратомірних діафрагм 2 до яких підключені диференційні манометри 7.

Постійні витратомірних діафрагм:

$$C_1 = 2,86 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{5/2} / \text{с} - \text{для гарячої води};$$

$$C_2 = 1,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{5/2} / \text{с} - \text{для холодної води}.$$

Температура холодної і гарячої води на вході і виході теплообмінника вимірюється за допомогою термопар 10, підключених до мілівольтметра 6, шкала якого проградуєвана у градусах Цельсія.

При необхідності підключення якої-небудь з трьох термопар до мілівольтметра використовують перемикач 3, який має 4 положення: у 1-му положенні вимірюється температура t_1' гарячої води на вході в теплообмінник; у 2-му - t_2'' холодної води на виході з теплообмінника; у 3-му - t_1'' гарячої води на виході з теплообмінника.

Температура холодної води на вході в теплообмінник t_2' вимірюється рідинним термометром, який занурюють у водопровідну воду, взяту з рукомийника.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. На які групи поділяються теплообмінні апарати?
2. За яким рівнянням розраховують поверхню теплопередачі?
3. Як розрахувати коефіцієнт теплопередачі? Фізичний зміст коефіцієнта теплопередачі.
4. Пояснити принцип розрахунків коефіцієнтів теплопередачі?
5. Що є рухомою силою теплообміну? Принцип її розрахунку для рекуперативних теплообмінників ?
6. Які параметри визначають з рівняння балансу?
7. За якою формулою розраховують коефіцієнт теплопередачі для циліндричних поверхонь?

ЛІТЕРАТУРА

1. Швець І.Т., Кіраковський М.Ф., Загальна теплотехніка та теплові двигуни. -К. «Вища школа» 1977. С. 56 - 60, 64 - 66.
2. Теплотехника: Учеб. Для вузов / А.П. Баскаков, Б.В. Берг, О.К. Витт и др.; Под ред. А.П. Баскакова. – 2-е узд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1991. С. 97 – 110.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Обережно відкрити вентиль 9 і заповнити водою ємність 8, після чого вентиль 9 закрити.
2. Включити підігрівач і нагріти воду до 70 - 90 °С.
3. Дуже обережно (під наглядом викладача або лаборанта) відкрити вентилі 9 і 1, запустивши теплоносії до теплообмінника. При цьому підігрівач води не вимикається.
4. Виміри температур t_1' , t_2'' , t_1'' проводяться при стаціонарному режимі (коли стабілізуються температури).
5. Виміряти покази диференційних манометрів Δh_1 і Δh_2 .
6. Закрити вентилі 9 і 1, знов підігріти воду в ємності 8 до 70 - 90 °С і повторити дослід.

Виміри повторюють при трьох різних значеннях витрат гарячої або холодної води (за вказівками викладача). Результати вимірювань занести до таблиці 7.1.

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

1. Привести результати розрахунків об'ємних витрат і вимірів температури гарячої та холодної води теплообмінника. Дані занести до таблиці 7.1.

2. Привести розрахунки параметрів теплообмінного апарата згідно п. п. 2 – 10 (розділ «Обробка дослідних даних»). Результати занести до таблиці 7.3.

Таблиця 7.1.

№ з/п	Вимірюваний параметр	Позначення	Одиниця	Номер досліду		
				1	2	3
1.	Витрати гарячої води	V_1	m^3/c			
2.	Витрати холодної води	V_2	m^3/c			
3.	Температура холодної води на вході	t_2'	$^{\circ}C$			
4.	Температура гарячої води на вході	t_1'	$^{\circ}C$			
5.	Температура холодної води на виході	t_2''	$^{\circ}C$			
6.	Температура гарячої води на виході	t_1''	$^{\circ}C$			

ВІДОМОСТІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

1. За інструкцією до лабораторної роботи та рекомендованою літературою ознайомитися з теорією вільної та вимушеної теплопередачі, класифікацією теплообмінних апаратів, їх будовою та принципом дії.

2. Ознайомитися з будовою експериментальної установки з дослідження процесу теплопередачі в теплообміннику «Труба в трубі» та послідовністю виконання роботи. Проаналізувати методику визначення об'ємних витрат теплоносіїв та вимірювання їх температур на вході та виході теплообмінника.

3. Коротко письмово відповісти на контрольні питання.

Таблиця 7.2.

ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВОДИ НА ЛІНІЇ НАСИЧЕННЯ

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{Дж/(кгК)}$	$\lambda, 10^{-2} \text{Вт/(мК)}$	$a, 10^{-8} \text{м}^2/\text{с}$	$\mu, 10^{-6} \text{Н/(с/м}^2)$	$\nu, 10^{-6} \text{м}^2/\text{с}$	$\beta, 10^{-4} \text{К}^{-1}$	Pr
0	999,9	4,212	55,1	13,1	1788	1,789	-0,63	13,67
10	999,7	4,191	57,4	13,7	1306	1,306	0,70	9,52
20	998,2	4,183	59,9	14,3	1004	1,006	1,82	7,02
30	995,7	4,174	61,8	14,9	801,5	0,805	3,21	5,42
40	992,2	4,174	63,5	15,3	653,3	0,659	3,87	4,31
50	988,1	4,174	64,8	15,7	549,4	0,556	4,49	3,54
60	983,1	4,179	65,9	16,0	469,9	0,478	5,11	2,98
70	977,8	4,187	66,8	16,3	406,1	0,415	5,70	2,55
80	971,8	4,195	67,4	16,6	355,1	0,365	6,32	2,21
90	965,3	4,208	68,0	16,8	314,9	0,326	6,95	1,93
100	958,4	4,220	68,3	16,9	282,5	0,295	7,52	1,58

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ПОРШНЕВОГО КОМПРЕСОРА

МЕТА РОБОТИ: ознайомлення з будовою та принципом роботи одноступінчатого двоциліндрового поршневого компресора та визначення його основних характеристик.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння

ЗНАННЯ: основних закономірностей термодинамічних процесів стискування газів в компресорних установках; будови й принципу дії компресорних установок.

ВМІННЯ: проводити експериментальне дослідження та розрахунок основних параметрів одноступінчатого поршневого компресора; будувати індикаторну діаграму компресора.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ: лабораторна установка для дослідження компресора, оснащена контрольно-вимірювальними приладами.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Компресор – машина, призначена для стискування повітря або газу до надлишкового тиску не нижче 0,015 МПа.

За будовою розрізняють компресори об'ємні (поршневі та ротаційні), в яких стискування газу здійснюється при зменшенні замкнутого об'єму; лопаткові (відцентрові та осьові), в яких силова дія на газ здійснюється обертаючимися лопатками, і струйні, принцип роботи яких подібний до принципу дії струйних насосів.

Компресори можуть бути одно- та багатоступінчастими. Останні використовуються для отримання великих тисків.

Будову та принцип дії поршневого компресора див. у І.Т. Швець, М.Ф.Кіраковський. Загальна теплотехніка і теплові двигуни. К.: Вища школа., 1977. с.229.

Газ у компресорі залежно від умов підведення й відведення теплоти може стискатися або ізотермічно, або адіабатично, або політропічно.

При ізотермічному процесі на стискування газу потрібно витратити роботу:

$$L_{iz.} = P_1 \cdot V_1 \cdot \ln \frac{P_2}{P_1} \text{ Дж}, \quad (1)$$

При адіабатичному:

$$L_{ad.} = \frac{k}{k-1} \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \text{ Дж}, \quad (2)$$

При політропічному:

$$L_n = \frac{m}{m-1} \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} - 1 \right] \text{ Дж,} \quad (3)$$

де P_1, P_2 – початковий та кінцевий тиск газу (до і після стискування), V_1 – початковий об'єм газу, м^3 ;

$$k = \frac{C_p}{C_v} \text{ – показник адіабати (для повітря } k = 1,4\text{);}$$

$$m = \frac{C_n - C_p}{C_n - C_v} \text{ – показник політропи (для повітря } m = 1,2 \div 1,25\text{);}$$

C_p, C_v, C_n – питома теплоємність газу при сталому тиску, об'ємі та теплоємність політропічного процесу, відповідно.

Витрати роботи при ізотермічному процесі найменші.

При адіабатичному стискуванні газу підвищуються одночасно витрати роботи і температури. Тому для запобігання руйнуванню або зіпсуванню компресора його потрібно охолоджувати. На практиці для контролю за роботою компресора користуються індикаторними діаграмами (Рис.8.1.), на яких відображають зміну тиску або об'єму газу, що фактично вимірюється при роботі компресора.

Теоретично, всмоктування газу компресором починається з моменту зсування поршня з верхньої мертвої точки (*В.М.Т.*). В дійсності, завдяки наявності шкідливого простору між поршнем та головкою, циліндра, в останньому завжди є газ, що стиснутий до тиску в лінії нагнітання. Тому для того, щоб починалося всмоктування, цей тиск повинен впасти нижче тиску в лінії всмоктування, тобто до початку всмоктування, поршень повинен пройти деяку відстань.

Внаслідок наявності стиснутого газу у шкідливому просторі при русі поршня від одного крайнього положення до іншого в циліндр буде всмоктано об'єм V , дещо менший за такий, що описує поршень за один хід V_1 , тобто:

$$V = \lambda_0 \cdot V_1, \quad (4)$$

де λ_0 – об'ємний *ККД* компресора

$$\lambda_0 = 1 - \sigma \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{m}} - 1 \right], \quad (5)$$

де $\sigma = \frac{V_0 - V_1}{V_1}$ – коефіцієнт шкідливого простору для даного компресора,

V_0 – повний об'єм циліндра.

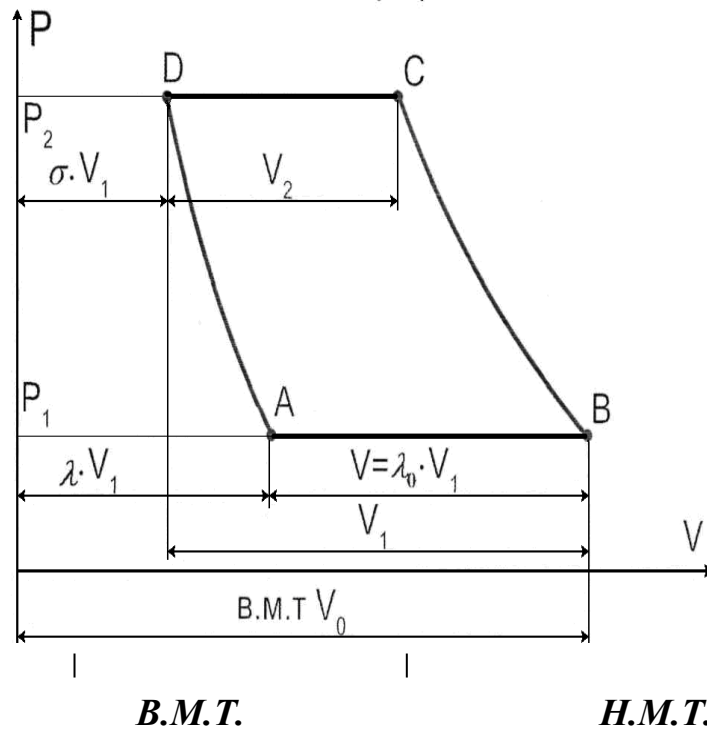


Рис 8.1. Індикаторна діаграма компресора.
 АВ - лінія всмоктування, СД –лінія нагнітання.

Об'ємний *ККД* компресора (λ_0), який враховує вплив шкідливого простору визначають графічно за допомогою індикаторної діаграми (див. рис. 8.1.).

Практично числове значення об'ємного *ККД* залежить від тиску, до якого стиснено газ. Чим він більший, тим більший об'єм займе у шкідливому просторі стиснутий газ при розширенні, і, тим менший об'єм свіжого газу буде всмоктано в циліндр. Підвищуючи тиск газу можна дійти такого стану, коли газ, що залишився в шкідливому просторі, при зворотному ході поршня посяде весь об'єм циліндра, таким чином фактично всмоктування свіжого газу не відбуватиметься, тобто $\lambda_0 = 0$ або з рівняння (5) маємо:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{1-\sigma}{\sigma} \right)^m \quad (6) \text{ – поріг стискування компресора.}$$

За один оберт кривошипа через компресор пройде об'єм повітря, що дорівнює:

$$V_1 = i F S = i \frac{\pi d^2}{4} S, \text{ м}^3 \quad (7)$$

Продуктивність компресора без урахування впливу шкідливого простору:

$$V_{теор.} = V_1 n, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}, \quad (8)$$

де: i – кількість циліндрів компресора, F – площа поршня (d – діаметр, m^2). S – хід поршня, m , n – швидкість обертання кривошипа або колінчатого вала компресора, *об/с*.

Фактично об'єм повітря, що нагнітає компресор, менше об'єму, що визначений за індикаторною діаграмою. Це обумовлено втратами через нещільності у клапанах, втратами тиску у процесі всмоктування, нагрів газу на вході в циліндр при дотиканні з розігрітими стінками та газом у шкідливому просторі, а також внаслідок вологості газу, що стискується.

Відношення об'єму газу, що фактично подається V_{∂} до об'єму, що описує поршень V_1 називають коефіцієнтом подачі, або продуктивності:

$$\lambda = \frac{V_{\partial}}{V_1}. \quad (9)$$

Продуктивність в умовах всмоктування визначається:

$$V_{\partial}^e = V_{cm} \cdot \frac{P_2}{P_1} \cdot \frac{T_1}{T_2}, \quad m^3/c, \quad (10)$$

де P_2 і T_2 – тиск та абсолютна температура стиснутого газу, P_1 і T_1 , – тиск та абсолютна температура всмоктуваного газу (у даній роботі газ – повітря в умовах лабораторії);

V_{cm} – секундні об'ємні витрати повітря, які вимірюються ротаметром в досліді.

Тоді враховуючи теоретичну продуктивність (8), коефіцієнт подачі в умовах досліді буде: $\lambda = \lambda_0$

$$\lambda_0 = \frac{V_{\partial}^e}{V_{теор}}. \quad (11)$$

Знаючи величину потужності електродвигуна $N_{\partialв.}$ за паспортними даними, що приводить в дію вал компресора, можна визначити коефіцієнт корисної дії установки:

$$\eta = \frac{L_n \cdot V_{\partial}^e}{N_{\partialв.}} \quad (12)$$

де L_n – робота компресора, віднесена до 1 м^3 газу (повітря).

ОПИС ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

Експериментальна установка (див. рис. 8.2) складається з компресора – двохциліндрового поршневого 3, який нагнітає повітря в бак 7. Тиск (надлишковий) у баці вимірюється пружинним манометром 5. Тиск всмоктуваного повітря (тобто атмосферний) – лабораторним барометром. Температура стиснутого повітря визначається за допомогою термометра 2, яка підключена до мілівольтметра 1.

Для визначення об'ємних витрат стиснутого повітря використовується ротаметр 4 з прикладеним графіком його градуювання (крива градуювання ротаметра наведена у кінці інструкції). Для випуску стиснутого повітря із баку використовують вентиль 6. Паспортні дані компресора, електродвигуна і постійна термopари (A_t) наведені в таблиці, що подається до установки.

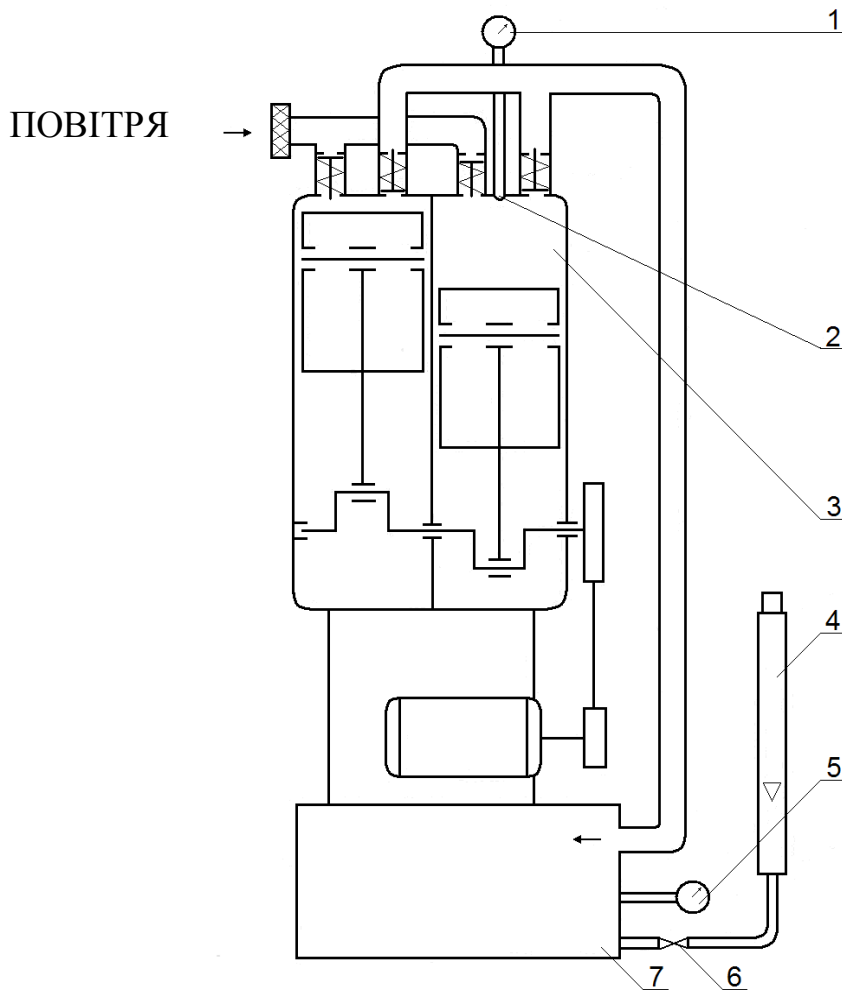


Рис. 8.2. Схема установки для вивчення роботи одноступінчатого компресора: 1 – мілівольтметр, 2 – термopара, 3 – компресор, 4 – ротаметр, 5 – манометр, 6 – вентиль, 7 – бак.

КОНТРОЛЬНІ ПИТАННЯ

1. Яку машину називають компресором? Типи компресорів та їх застосування. Принцип роботи.
2. Які процеси можливо використати в компресорі для стискування газів?
3. Який процес стиску газу є найвигіднішим? При якому процесі витрати роботи найбільші?

4. За якими формулами визначають роботу стискування при різних процесах?
5. Чим відрізняється теоретична індикаторна діаграма від дійсної?
6. Чому не можна одержати газ високого тиску в одноступінчатому компресорі?
7. Що являє собою шкідливий об'єм робочого циліндра компресора та який його вплив на процес стискування газу?
8. Які основні характеристики компресора?

ЛІТЕРАТУРА

1. Швець І.Т., Кіраковський М.Ф.. Загальна теплотехніка і теплові двигуни. К.: Вища школа., 1977. с.229.
2. Швець И.Т. и др. Теплотехніка. «Вища школа», 1976, С. 296 – 313.

ПОСЛІДОВНІСТЬ ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Повністю відкрити вентиль 6 випуску повітря з баку 7 та запустити компресор.
2. Поступово закриваючи вентиль 6, встановити заданий викладачем тиск P_2 у баці 7.
3. За допомогою ротаметра і кривої градування визначити дійсну об'ємну продуктивність V_{cm} компресора.
4. Виміряти температуру стиснутого повітря t_2 за допомогою термопари ($t_2 = A_t \cdot N_{mv}$) і всмоктуваного t_1 повітря за допомогою лабораторного термометра.
5. Після вимірів повністю відкрити кран 6 і вимкнути компресор.
6. Визначити за формулами (7), (8), (10), (11), коефіцієнт подачі $\lambda = \lambda_0$ компресора, а за формулою (5) – σ – коефіцієнт шкідливого об'єму. При розрахунках треба мати на увазі, що до формул підставляють абсолютне значення тиску $P_2 = P_{ман} + P_{атм}$ і абсолютну температуру $T_{1-2} = t_{1-2} + 273$. Манометром вимірюється надлишковий тиск у баці 7.
7. Визначити роботу стиску 1 м^3 повітря по формулі:

$$L_n = \frac{m}{m-1} \cdot P_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\left(\frac{m-1}{m} \right)} - 1 \right] \text{ Дж/м}^3$$

8. За формулою (12) визначити *ККД* установки.
9. Результати вимірювань та підрахунків занести до табл.9.1
10. Вважаючи, що $\lambda = \lambda_0$ та визначивши за формулою (7) V_1 , розрахувати значення V , V_0 , σ , V_1 , побудувати індикаторну діаграму компресора. Масштаб по осі Y : 20 мм – 1 атм. тиску, по осі X : 10 мм – 10 см³ об'єму 2-х циліндрів.

Значення V_2 знаходять із рівняння політропи:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^m$$

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

1. Привести дані вимірів барометричного та манометричного тиску повітря та його температури до і після стискування в компресорі у таблиці 9.1

2. Привести розрахунки параметрів поршневого компресора згідно п. п. 6 – 8. Результати занести до таблиці 9.1.

Таблиця 9.1

$T, \text{град. К}$		$P, \text{атм.}$		$V, \text{м}^3/\text{с}$			$\frac{P_2}{P_1}$	λ	σ	η
T_1	T_2	P_1	P_2	V_{cm}	V_0^e	$V_{теор.}$				

3. Побудувати для одного з дослідів (за вказівкою викладача) згідно пункту 10 індикаторну діаграму досліджуваного компресора. Навести розрахунки V , V_0 , σ , V_1 , V_2 та перевести їх значення в одиниці масштабу.

4. Зробити висновки.

ВІДОМОСТІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

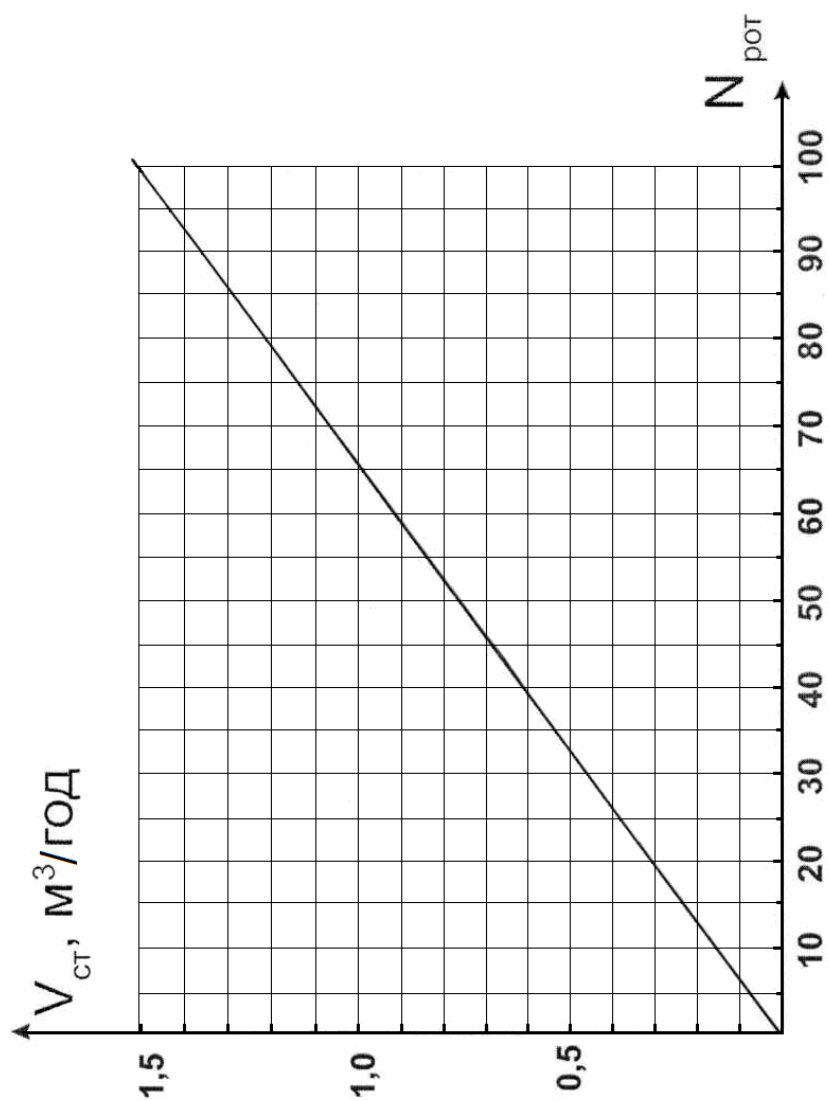
1. За інструкцією до лабораторної роботи та рекомендованою літературою ознайомитися з класифікацією компресорних установок їхньою будовою та принципом дії.

2. Ознайомитися з будовою експериментальної установки з дослідження поршневого компресора та послідовністю виконання роботи. Проаналізувати методику вимірювання барометричного та манометричного тиску повітря,

температури за допомогою термопари, об'ємних витрат стиснутого повітря за допомогою ротаметра.

3. Коротко письмово відповісти на контрольні питання.

Крива градування ротаметра



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №9
ДОСЛІДЖЕННЯ ХОЛОДИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ
КОМПРЕСОРНОГО ТИПУ

МЕТА РОБОТИ: ознайомитись з принципом роботи холодильних установок різних типів та з'ясувати будову і роботу холодильників компресорного типу.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння

ЗНАННЯ: принцип роботи абсорбційних, паро ежекторних, термоелектричних та компресорних холодильників; аналіз параметрів роботи холодильників різних типів; межі застосування холодильників різних типів.

ВМІННЯ: розрізняти холодильники різних типів; досліджувати роботу холодильних машин.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ: лабораторна установка.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Холодильна машина – пристрій, що служить для відводу тепла від охолоджуваного тіла при температурі нижчій, ніж температура навколишнього середовища. Процеси, що відбуваються в холодильних машинах, є окремим випадком термодинамічних процесів, тобто таких, в яких відбувається послідовна зміна параметрів стану робочої речовини: температури, тиску, питомого об'єму, ентальпії. Холодильні машини працюють за принципом теплового насосу – відбирають тепло від охолоджуваного тіла і передають його в охолоджуюче середовище (зазвичай воді або навколишньому повітрю), що має більш високу температуру, ніж охолоджуване тіло. Холодильні машини використовують для отримання температур від 10°C до – 150 °C. Область нижчих температур відноситься до кріогенної техніки. Робота холодильної машини характеризується їх холодопродуктивністю.

Холодильний агент (холодоагент) – робоча речовина холодильної машини, яка при кипінні і в процесі ізотермічного розширення відбирає теплоту від охолоджуваного об'єкту і потім після стискування передає її охолоджувальному середовищу за рахунок конденсації (воді, повітрю і т.д.). Основними холодильними агентами є аміак, фреони (хладони), і деякі вуглеводні.

Слід розрізняти холодоагенти і кріоагенти. У кріоагентів нижча температура кипіння. Це не стосується компресійних кріоагентів, які з'явилися останнім часом, здатних охолоджувати до температур нижче - 120°C без застосування рідкого азоту, як це було прийнято останні сто років.

Аміак – газ без кольору із задушливим запахом. Газоподібний аміак легший за повітря, рідкий проводить електричний струм. Температура кипіння аміаку при атмосферному тиску становить $33,4^{\circ}\text{C}$, температура замерзання $-77,7^{\circ}\text{C}$. Це доступний і дешевий холодоагент.

Хладон-12 – важкий газ без кольору з дуже слабким запахом, один з найменш шкідливих холодоагентів, нормальна температура кипіння – $29,8^{\circ}\text{C}$.

Хладон-22 – важкий газ без кольору, має сприятливі експлуатаційні та фізичні властивості, вибухонебезпечний, негорючий. При атмосферному тиску кипить при температурі – 40°C , а замерзає при – 160°C . Об'ємна холодопродуктивність у нього вища ніж хладону-12.

Перша холодильна машина з'явилася в середині XIX ст. Одна з найстаріших холодильних машин – абсорбційна. Її винахід і конструктивне оформлення пов'язано з іменами Дж. Леслі (Великобританія, 1810), Ф. Карре (Франція, 1850) і Ф. Віндхауза (Німеччина, 1878). Перша парокомпресійна машина, яка працювала на ефірі, побудована Дж. Перкінсом (Великобританія, 1834). Пізніше були створені аналогічні машини з використанням в якості холодоагента метилового ефіру і сірчистого ангідриду. У 1874 К. Лінде (Німеччина) побудував аміачну парокомпресійну холодильну машину, яка поклала початок холодильного машинобудування.

В основі роботи холодильників лежить холодильний цикл. Простий паровий цикл механічної холодильної машини реалізується за допомогою чотирьох елементів, що утворюють замкнутий холодильний контур, – компресора, конденсатора, дросельного вентиля і випарника або охолоджувача (рис. 4.55).

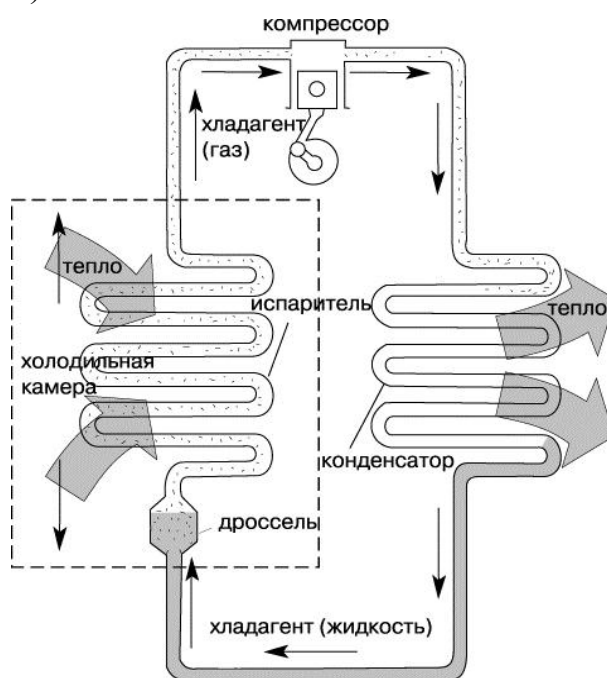


Рис. 4.55. Схема холодильного циклу

Пара з випарника поступає в компресор і стискається, внаслідок чого її температура підвищується. Після виходу з компресора пара, що має високі температуру і тиск, надходить у конденсатор, де охолоджується і конденсується. У деяких конденсаторах використовується режим переохолодження, тобто подальше охолодження сконденсованої рідини нижче її температури кипіння. З конденсатора рідина проходить через дросельний вентиль. Оскільки температура кипіння (насичення) для даного тиску виявляється нижче температури рідини, починається її інтенсивне кипіння; при цьому частина рідини випаровується, а температура решти опускається до рівноважної температури насичення (тепло рідини витрачається на її перетворення в пару). Процес дроселювання іноді називають внутрішнім охолодженням або самоохолодженням, оскільки в цьому процесі температура рідкого холодоагента знижується до потрібного рівня. Таким чином з дросельного вентиля виходять насичена рідина і насичена пара. Насичена пара не може ефективно відводити тепло, тому вона перепускається повз випарник і подається прямо на вхід компресора. Між дроселем і випарником встановлений сепаратор, в якому пара і рідина розділяються.

Принцип дії компресійних холодильних машин

Компресійні холодильники – найбільш поширені та універсальні (рис. 4.56).

Основними складовими частинами такого холодильника є:

- компресор (К), який приводиться в дію електродвигуном;
- конденсатор (Кон), що знаходиться зовні холодильника;
- випарник (В), що знаходиться всередині холодильника;
- терморегулюючий розширювальний вентиль, ТРВ, що є дроселюючим пристроєм (Д);
- холодоагент, що циркулює у системі, речовина з певними фізичними характеристиками.

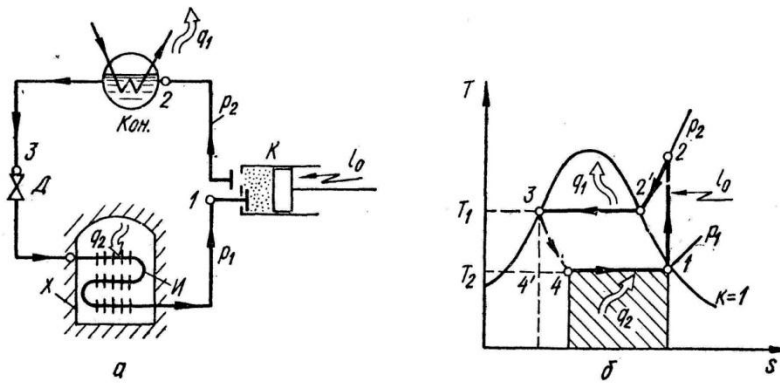


Рис. 4.56. Схема (а) і $T - s$ -діаграма
(б) циклу парокompресорної холодильної установки
K – компресор, *Кон* – конденсатор,
В – випарник, *Д* – дросельний вентиль

До всіх елементів холодильної машини ставиться вимога високої герметичності. Залежно від виду холодильного компресора компресійні машини поділяються на поршневі, турбокомпресорні, ротаційні і гвинтові.

Холодоагент під тиском через дросельний отвір (капіляр або ТРВ) надходить у випарник, де за рахунок різкого зменшення тиску відбувається випаровування рідини і перетворення її в пару. При цьому холодоагент відбирає тепло з внутрішніх стінок випарника, за рахунок чого відбувається охолодження внутрішнього простору холодильника.

Компресор засмоктує з випарника холодоагент у вигляді пари, стискає її, за рахунок чого температура холодоагенту підвищується, й виштовхує в конденсатор.

У конденсаторі, нагрітий у результаті стиску холодоагент остиває, віддаючи тепло в зовнішнє середовище, і конденсується, тобто перетворюється в рідину. Процес повторюється знову.

Таким чином, у конденсаторі холодоагент під впливом високого тиску конденсується і переходить в рідкий стан, виділяючи тепло, а у випарнику під впливом низького тиску закипає і переходить в газоподібний, поглинаючи тепло.

Терморегулюючий вентиль (ТРВ) потрібний для створення необхідної різниці тисків між конденсатором і випарником, при якій відбувається цикл теплопередачі. Він дозволяє правильно (найбільш повно) заповнювати внутрішній простір випарника холодоагентом. Пропускний перетин ТРВ змінюється в міру зниження теплового навантаження на випарник, при зниженні температури в камері кількість циркулюючого холодоагента зменшується. Капіляр – це аналог ТРВ. Він не змінює свій розтин, а дроселює

певну кількість холодоагента, залежно від тиску на вході і виході капіляра, його діаметра і типу холодоагента.

Звичайно також наявний теплообмінник, що вирівнює температуру на виході з конденсатора і з випарника. У результаті до дроселя надходить уже охолоджений холодоагент, який потім ще сильніше охолоджується в випарнику, в той час як холодоагент, що надійшов з конденсатора підігрівається, перш ніж вступити в компресор і конденсатор. Це дозволяє збільшити ефективність холодильника.

При досягненні необхідної температури температурний датчик розмикає електричний ланцюг і компресор зупиняється.

При підвищенні температури (за рахунок зовнішніх факторів) датчик знову включає компресор.

Для підвищення економічної ефективності холодильної машини (зниження витрат енергії на одиницю забраного від охолоджуваного тіла кількості теплоти) іноді перегрівають пару, яка засмоктується компресором, і переохолоджують рідину перед дроселюванням. З цієї ж причини для отримання температур нижче -30°C використовують багатоступінчасті або каскадні холодильні машини.

У багатоступінчастих холодильних машинах стиснення пари проводиться послідовно в декілька ступенів з охолодженням її між окремими ступенями. При цьому в двоступінчастих холодильних машинах отримують температуру кипіння холодоагента до -80°C .

У каскадних холодильних машинах, що представляють собою кілька послідовно з'єднаних холодильних машин, які працюють на різних, найбільш придатних за своїми термодинамічними властивостями для заданих температурних умов холодоагента, отримують температуру кипіння до -150°C .

ЗАВДАННЯ ДО РОБОТИ

1. З'ясувати будову холодильника компресорного типу.
2. Визначити технічні характеристики лабораторної установки (максимальна температура охолодження, споживча потужність, об'єм охолоджувальної камери тощо)
3. Скласти схему будови лабораторної холодильної установки та її електричну схему.

ЛІТЕРАТУРА

1. Гетта В. Г. [Теплотехніка і теплові машини] / В. Г. Гетта. – Чернігів : ЧНПУ імені Т.Г. Шевченка, 2015. –400с.
2. Лебедев В.Ф. *Холодильная техника* / В.Ф. Лебедев, И.Т. Чумак, Т.Д. Аверин; Под ред. В.Ф. Лебедева. – М.: Агропромиздат, 1986. – 335 с.

3. Швець І.Т., Теплотехніка /І.Т.Швець, Голубинський В.І., Алабовський А.Н., Кираковський Н.Ф., Недужий І.А., Пивоваров Л.А. – К.: Вища школа, 1976. – 513 с.

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

ВІДОМОСТІ ДЛЯ САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ

Принцип дії абсорбційних холодильних машин

У абсорбційних холодильних установках циркуляція холодоагента здійснюється в результаті процесу абсорбції поглинання холодоагента рідким розчинником – абсорбентом.

Робочою речовиною в абсорбційних холодильниках служать розчини двох компонентів з різними температурами кипіння при однаковому тиску. Компонент, який кипить при більш низькій температурі, виконує функцію холодоагента; другий служить абсорбентом. В межах температур від 0 до -45°C застосовують машини, де робочою речовиною служить водний розчин аміаку (холодоагент – аміак). При температурах охолодження вище 0°C переважно використовують абсорбційні машини, що працюють на водному розчині броміду (холодоагент – вода).

У абсорбційних системах зберігаються конденсатор (Кон) (рис. 4.57), дросельний вентиль (Д) і випарник (В), але замість компресора використовують чотири інших елементи: абсорбен (A_2), насос (H_1), парогенератор (кип'ятильник) і редукційний клапан (D_1).

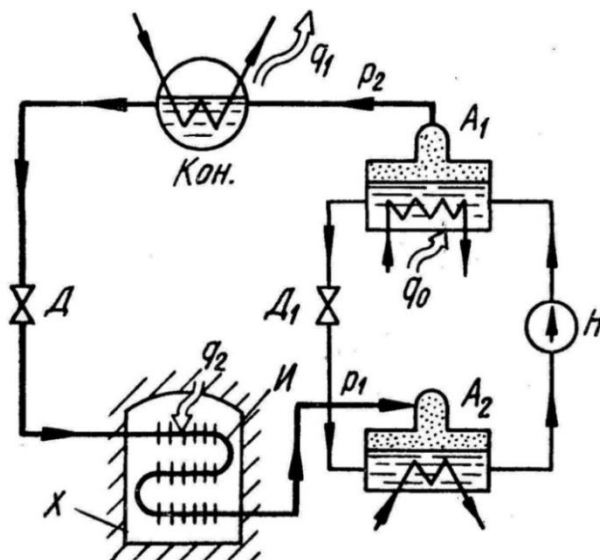


Рис. 4.57.Схема абсорбційної холодильної установки

A_1 – парогенератор (кип'ятильник), Кон – конденсатор, В – випарник, A_2 – абсорбер, Н – насос, Д – дросельний вентиль, D_1 – дросельний вентиль для поповнення асорбента у абсорбер

Пара з випарника потрапляє в абсорбер. Там вона стикається з абсорбуючою рідиною, яка поглинає пару. Тиск в абсорбері при цьому знижується, що забезпечує безперервне надходження пари з випарника. У процесі абсорбції відбувається виділення тепла, отже, абсорбер повинен охолоджуватися, наприклад, за рахунок циркуляції води. Холодна суміш абсорбуючої рідини і холодоагента надходить у насос, в якому її тиск підвищується. Оскільки підвищення тиску рідини супроводжується лише незначною зміною її об'єму, то необхідна для цього робота мала. Після виходу з насоса холодна рідина високого тиску надходить в кип'ятильник, де до неї підводиться тепло, і велика частина холодоагента випаровується. Ця помірно перегріта пара високого тиску проходить через конденсатор і робить звичайний холодильний цикл, а абсорбент охолоджується і повертається в абсорбер (через редукційний клапан) для повторення циклу. Дійсний абсорбційний цикл відрізняється від ідеального тим, що частина абсорбенту випаровується в кип'ятильнику і переноситься разом з парою холодоагентом. Якщо його не відокремити від холодоагента до входу у випарник, то це призведе до підвищення температури у випарнику, або тиск у випарнику буде значно меншим тиску насичення при тій температурі, яка повинна бути у випарнику. Відділення абсорбенту від холодоагента частково відбувається в сепараторі, що розташований між конденсатором і кип'ятильником і служить для конденсації абсорбенту та повернення його в кип'ятильник разом з невеликою кількістю супутнього холодоагента. Механічна робота абсорбційних холодильних установок значно менше, ніж компресійних, проте загальні витрати енергії значно вищі. Енергія, яка підводиться до кип'ятильника на багато більша тієї, яка відводиться від абсорбера охолоджуючою водою. Там, де електроенергія дорога, а теплова енергія і охолоджуюча вода дешеві, абсорбційні установки більш вигідні, ніж компресійні. Застосування абсорбційних машин вигідне на підприємствах, де є вторинні енергоресурси (відпрацьована пара, гаряча вода, газ, що виділяють промислові печі тощо).

Принцип дії пароежекторних холодильних машин

Спосіб отримання холоду без здійснення механічної роботи полягає в ежекції пари випарника. У такій установці холодоагентом є вода, тому температура в холодильній камері не може бути нижче 0°C.

Пароежекторний холодильник складається з ежектора (Е), випарника (В), конденсатора (Кон), насоса (Н) і ТРВ (рис. 4.58).

Холодоагентом служить вода, як джерело енергії використовується пара тиском 0,3-1 МН/м² який надходить в сопло ежектора, де розширюється.

У результаті в ежекторі, як наслідок, у випарнику машини створюється знижений тиск, якому відповідає температура кипіння води трохи вище 0°C (зазвичай близько 5°C). У випарнику за рахунок часткового випаровування відбувається охолодження камери (продукції). Відсмоктана з випарника пара, а також робоча пара ежектора надходить у конденсатор, де переходить у рідкий стан, віддаючи теплоту охолоджувальному середовищу. Частина води з конденсатора подається у випарник для поповнення витрат охолоджувальної води.

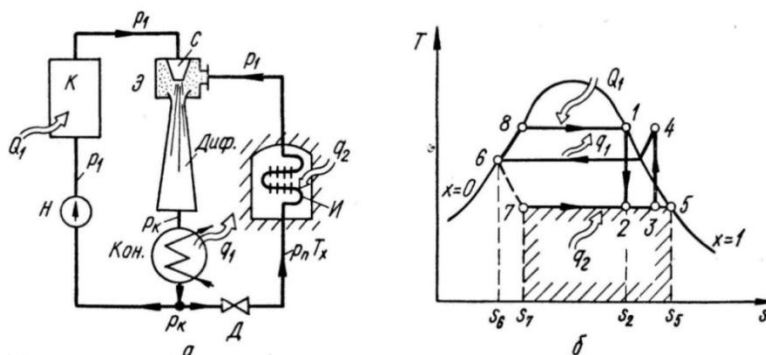


Рис. 4.58.Схема (а) і $T - s$ -діаграма (б) циклу пароежекторної холодильної установки

Пароежекторні установки знаходять застосування у виробництві, там, де є пара високого та середнього тиску і дешева вода для охолодження. Ці установки використовуються також на суднах, оскільки невелика кількість рухомих частин спрощує їх обслуговування і ремонт.

Принцип дії холодильних машин на вихрових охолоджувачах

Охолодження здійснюється за рахунок розширення попередньо стисненого компресором повітря в блоках спеціальних вихрових охолоджувачів (рис. 4.59).

Поширення вона не набула із-за великої шумності, необхідності підведення стисненого (до 10-20 атмосфер) повітря і дуже великої його витрати, низького ККД. Переваги – більша безпека використання, так як у їх конструкції не використовується електрика, немає ні рухомих механічних частин, ні небезпечних хімічних сполук; довговічність, надійність.

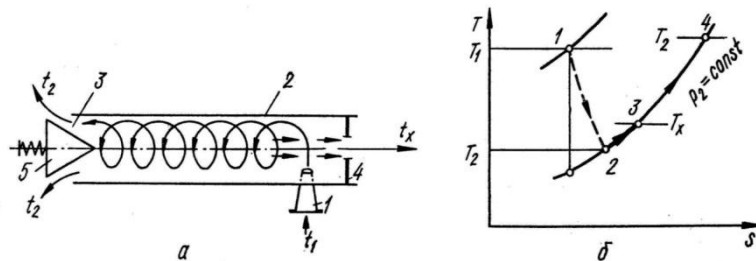


Рис. 4.59. Схема вихрової трубки (а)
і процес охолодження на $T - s$ -діаграмі (б)
1 – сопло, 2 – труба, 3 – регулюючий патрубкок,
4 – діафрагма

Повітряно-розширювальні холодильні машини відносяться до класу холодильно-газових машин. Холодоагентом служить повітря. В області температур близьких до -80°C економічна ефективність повітряних машин нижча, ніж парокompресійних. Більш економічними є регенеративні повітряні холодильні машини, в яких повітря перед розширенням охолоджується або в протиточному теплообміннику, або у теплообміннику-регенераторі. У залежності від тиску використаного стисненого повітря повітряні холодильні машини розділяються на машини високого та низького тиску. Розрізняють повітряні машини, що працюють за замкненим і розімкненим циклом.

Принцип дії термоелектричних холодильних машин

Робота термоелектричного холодильника базується на ефекті Пельтьє. Він безшумний, але великого розповсюдження не отримав через дороговизну охолоджуючих термоелектричних елементів. Тим не менше, сумки-холодильники, невеликі автомобільні холодильники часто робляться з охолодженням від елементів Пельтьє.

Термоелектричний холодильник працює на основі ефекту Пельтьє, який полягає у виділенні або поглинанні теплоти при проходженні електричного струму через спай термопари. На рис. 4.60 схематично показано поперечний переріз такого холодильника об'ємом 65 дм^3 , здатного підтримувати температуру холодильної камери на 10°C нижче температури навколишнього середовища. У верхній частині розташовані 72 термоелементи, що забезпечують охолодження, які споживають велику частину з 135 Вт електроенергії, необхідної для роботи холодильника. У каналі обдування повітрям розташовані спеціальні ребра для кращого відведення тепла, а в камері встановлені пластини для збільшення поверхні теплообміну. Подібні холодильники на суднах розраховані на зберігання шести тонн заморожених або охолоджених продуктів. Промисловість

випускає й інші типи термохолодильників, зокрема термостати для лабораторних потреб.

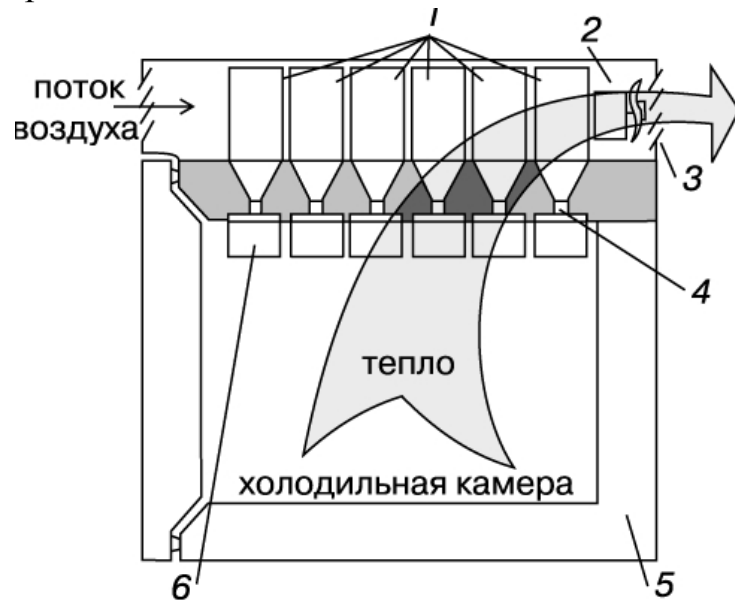


Рис. 4.60. Термоелектричний холодильник

*1 – охолоджуючі ребра, 2 – вентилятор, 3 – жалюзі,
4 – термоелементи, 5 – теплова ізоляція, 6 – холодні пластини*



РОЗДІЛ

З ЛАБОРАТОРНІ РОБОТИ ЗА ВИБОРОМ

Лабораторна робота № 1

Визначення параметрів вимірювальних приладів

Лабораторна робота № 2

Визначення теплоємності газів

Лабораторна робота № 3

Визначення технічних характеристик твердого палива

Лабораторна робота № 1

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИЛАДІВ

МЕТА РОБОТИ: виконати перевірку робочого манометра; визначати величину абсолютного тиску в посудині; заміряти температуру в калориметрі різними приладами.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння:

ЗНАННЯ: призначення і принцип роботи вимірювальних приладів.

ВМІННЯ: користуватись вимірювальними приладами, визначати їх параметри і точність вимірювання.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ: рідинні манометри різних типів, термометри, пірометри, лабораторні установки для вимірювання.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

1. Вимірювання тиску

Прилади, які вимірюють надлишковий тиск, називаються манометрами. Для вимірювання тиску оточуючого середовища використовують барометри, а для вимірювання розрідження – вакуумметри.

За призначенням ці прилади можна поділити на: а) манометри – це прилади, які застосовують для вимірювання надлишкового тиску (понад 0,03 МПа); б) напороміри – для вимірювання незначних (до 300 мм вод. ст.) надлишкових тисків (напорів); в) вакуумметри – для вимірювання значних величин розріджень; г) тягоміри – для вимірювання незначних розріджень (до 300 мм вод. ст.; г¹) тягонапороміри – для вимірювання незначних надлишкових тисків і незначних розріджень; д) барометри – для вимірювання тиску оточуючого середовища (атмосферного, або його називають барометричним); е) диференціальні манометри – для вимірювання різниці тисків.

За принципом роботи прилади для вимірювання тисків поділяються на: а) рідинні (рис. 1.) – тиск, розрідження або різниця тисків вимірюються за висотою стовпчика рідини, якою заповнений прилад; б) пружинні – тиск, розрідження вимірюються за величиною деформації пружного елемента (рис. 1.20) приладу; в) поршневі (вантажні) – котрі працюють за принципом зрівноважування сил, що утворюються з одного боку тиском, а з другого – тягарями, які діють на поршень, вміщений у циліндр; г) електричні – в яких тиск перетворюється в електричну величину і замірюється електровимірювальним приладом; г) спеціального призначення, зокрема електроконтактні з пневмодавачами тощо.

Рідинні прилади широко застосовуються для вимірювання невеликих тисків, розріджень і різниці тисків. Бувають U-подібні манометри, чашкові та мікроманометри.

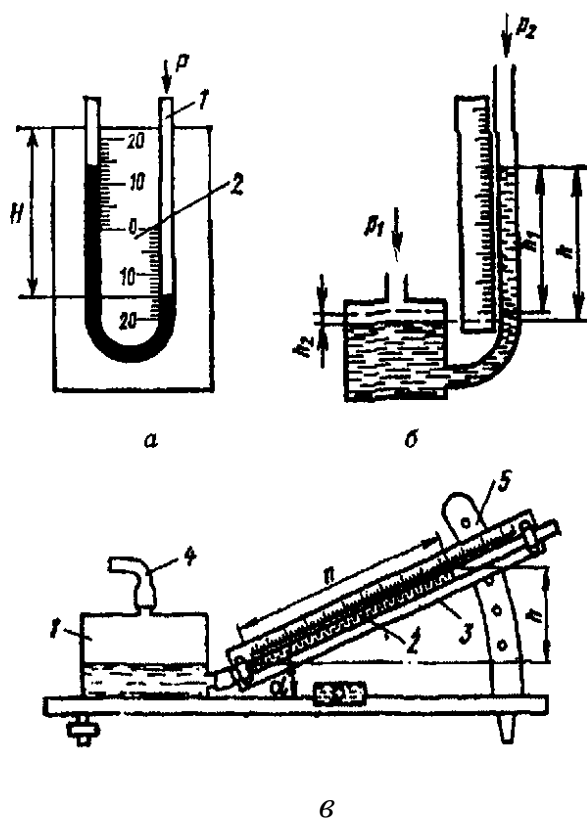


Рис. 1. Рідинні манометри: а) U-подібний: 1,2 – вимірні трубки; 3 – вертикальна основа; 4 – міліметрова шкала; б) чашковий манометр: 1 – чашка; 2 – вимірна трубка; 3 – міліметрова шкала; 4 – вертикальна основа; 5 – з'єднувальна трубка; в) мікроманометр: 1 – металічна посудина; 2 – вимірна трубка; 3 – міліметрова шкала; 4 – з'єднувальна трубка.

Чашковий манометр і мікроманометр відрізняються від U-подібного. У чашковому одна вимірювальна трубка виконана вигляді широкої посудини – чашки, а друга з нанесеними поділками стоїть вертикально. У мікроманометрі вимірювальна трубка з нанесеними поділками стоїть не вертикально, а може змінювати кут нахилу, що дає змогу робити відліки з більшою точністю. Заповнюються чашкові манометри і мікроманометри спиртом з питомою вагою $0,81 \text{ г/см}^3$, що збільшує ціну поділки шкали. Дійсна висота стовпчика робочої рідини у мікроманометра визначається за формулою:

$$h = n \cdot \sin \alpha,$$

n — кількість поділо..., α — кут нахилу вишрювальної трубки.

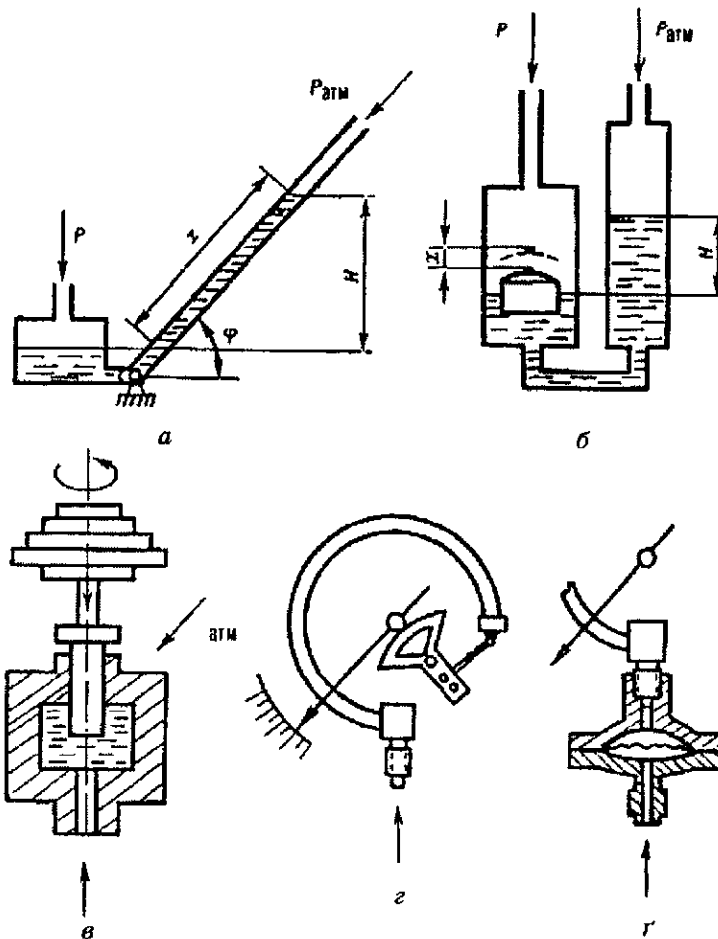


Рис. 2. Схеми видів манометрів: а – чашкові; б – поплавкові; в – вантажопоршневі; г – показувальний з кільцевою пружиною; Г – мембранний розділювач тисків із закритою камерою.

У процесі вимірювання тиску U-подібним манометром його з'єднують із середовищем одним коліном за допомогою з'єднувальних трубок (металевих або гумових), а друге коліно залишається відкритим. У випадку, коли робочою рідиною є ртуть, зверху її треба залити водою (1-2 мм заввишки), щоб запобігти утворенню шкідливих парів ртуті. Якщо тиск вимірюється за допомогою чашкового приладу або мікроманометра, то досліджуване середовище з'єднується з чашкою манометра, а у випадку вимірювання розрідження – з вимірювальною трубкою. Для вимірювання різниці тисків середовище з більшим тиском сполучається з чашкою манометра, а з меншим – з вимірювальною трубкою.

Пружинні манометри використовуються для визначення порівняно значних величин тисків. Крім манометрів, є також і пружинні вакуумметри, які служать для вимірювання розріджень, до 760 мм рт. ст.

Розрізняють такі види пружинних приладів: а) мембранні тягоміри і напороміри; б) манометри і вакуумметри з гармоніковою пружиною; в) манометри з гвинтовою трубчатою пружиною; г) манометри, вакуумметри і мановакуумметри з трубчатою пружиною; г) мембранні

Манометри пружинні можуть бути показувальними і самозаписуючими. Вони можуть мати пневмодавачі, якщо використовуються у системі автоматичного регулювання, а також можуть бути електроконтактними для використання їх у системах сигналізації.

Поршневі манометри працюють за принципом зрівноважування сил. Це означає, що вимірювальний тиск з одного боку зрівноважується тягарями, котрі діють на поршень, вміщений у циліндр, а з другого манометром, що його вимірює. Поршневі манометри використовуються для градування і перевірки пружинних манометрів. Точність цього приладу знаходиться у межах 0,02-0,2 % вимірювального тиску.

Електричні манометри використовують для вимірювання високих швидкозмінних тисків (у двигунах внутрішнього згорання), а також для вимірювання тисків на віддалі. Складаються з давача і показуючого приладу. Давачі можуть бути: а) п'єзокварцові - процес стиснення кристалу-діелектрика зумовлює на його поверхнях виникнення електричних зарядів, які пропорційні зовнішній силі; б) магнітопружні – коли зі зміною механічних зусиль змінюється магнітна проникливість; в) індуктивні – зміна положення стержня у котушці зумовлює зміну її індуктивності; г) ємнісні – внаслідок дії тиску змінюється віддаль між пластинками, що зумовлює зміну ємності давача.

Для вимірювання дуже високих тисків (понад 2000 кг/см²) використовують манганінові манометри, котрі працюють за принципом зміни електричного опору манганінової дротини від тиску.

Вибір приладу залежить від шуканої величини, фізичних властивостей робочого тіла, рідини (газу), а також потрібної точності вимірювання.

З метою забезпечення високої точності вимірювання (0,2 - 0,3 мм вод. ст.) незначних величин тисків (до 50 - 200 мм вод. ст.) використовують мікроманометри. Для більших значень тисків (150 - 7 00 мм вод. ст.) з необхідною точністю (1 мм рт. ст. або вод. ст.) застосовують U-подібні прилади. Для вимірювання тисків, більших від 0,03 МПа, можуть використовуватися пружинні манометри. Шкала приладу підбирається таким чином, щоб максимальна величина вимірювального тиску не перевищувала двох третин шкали у разі сталого навантаження і половини шкали для змінного навантаження. Мінімальний тиск не повинен бути менший від

третини шкали. Наприклад, щоб визначити у паровому котлі тиск пари в 10 кгс/см^2 , необхідно підібрати манометр з границею вимірювання до 15 кгс/см^2 .

На точність вимірювання тиску або розрідження, окрім похибки самого приладу, впливає також температура середовища та оточуючого повітря, місце взяття імпульсу та інші фактори.

Температура пружини манометра не повинна перевищувати $60 \text{ }^\circ\text{C}$. Щоб уникнути впливу високої температури на пружину манометра, прилад приєднують до трубопроводу, або апарата через сильфонну трубку, яка заповнена конденсатом або будь-якою нейтральною рідиною. Між манометром та сильфонною трубкою ставиться триходовий кран, що дає змогу робити продувку сильфонної трубки і виявляти несправність манометра, а також на місці перевіряти покази манометра.

Щоб на манометр не діяла висока температура оточуючого середовища, його необхідно розташовувати на віддалі від нагрітих частин машин, котлів та ін. Температура оточуючого середовища не повинна перевищувати $40 \text{ }^\circ\text{C}$.

Вибираючи місце для вимірювання тиску, необхідно стежити, щоб не було перешкод рухові рідини. У разі вимірювання розрідження газів у газоходах трубку для забору необхідно встановити так, щоб її переріз був паралельним рухові газів.

Згідно з правилами Комітету стандартів і вимірювальних приладів, перевірка манометрів та їх пломбування (клеймування) повинна проводитись не менше одного разу на 12 місяців. Крім цього, не менше одного разу на 6 місяців підприємство повинно робити перевірку робочих манометрів самостійно на робочому місці. Записи результатів перевірок приладів заносяться у журнал контрольних перевірок, який повинен бути на кожному підприємстві.

Пружинні вакуумметри, напороміри та тягоміри перевіряються шляхом порівняння їх показань з показами U-подібного манометра.

2. Вимірювання температури

Температура – це кінетична енергія руху частинок тіла. Практично виміряти кінетичну енергію молекул газу безпосередньо неможливо. Тому для вимірювання кінетичної енергії частинок тіла, тобто температури, використовують різні непрямі методи, а прилади для її фіксації називають термометрами або пірометрами. В основу роботи цих приладів закладено залежність зміни однієї з властивостей речовини (наприклад, теплове розширення рідини, газу, твердого тіла; зміна електричного опору, виникнення е. р. с., теплового випромінення) температури та нульовий закон термодинаміки (закон про теплову рівновагу тіл).

У міжнародній системі одиниць СІ температура вимірюється за термодинамічною шкалою Кельвіна. Вона будується відповідно до другого закону термодинаміки (на основі циклу Карно) незалежно від властивостей робочого тіла.

За принципом дії прилади для вимірювання температури класифікують так: а) термометри розширення - працюють за принципом зміни об'єму рідини або лінійних розмірів тіл зі зміною температури. Застосовуються для вимірювання температур у межах від -190 до $+600$ °С. Поділяються на біметалічні та рідинно-скляні; б) манометричні термометри – за принципом зміни тиску рідини, газу або пари у замкнутому об'ємі залежно від зміни температури, яка може вимірюватися на віддалі до 60 м, межі вимірювань - 120 до $+600$ °С; в) термометри опору – за принципом зміни електропровідності провідника або напівпровідника залежно від зміни температури. Застосовуються для вимірювання температур у межах від -200 до $+600$ °С; г) термоелектричні пірометри – за принципом виникнення електрорушійної сили у процесі зміни температури одного зі спаїв замкнутого кола різнорідних термоелектродів. Застосовуються для вимірювання температур у межах від -200 до $+1800$ °С; г') пірометри випромінювання – працюють за принципом зміни інтенсивності випромінювання нагрітих тіл залежно від зміни температури. Використовуються для вимірювання температур безконтактним методом у межах від $+500$ до 6000 °С.

Вимірювальною системою біметалічного термометра є дві тонкі металеві пластинки з різними температурними коефіцієнтами лінійного розширення, які жорстко з'єднані між собою за всією площиною контакту. Біметалічні термометри не набули розповсюдження як самостійні вимірювальні прилади. Їх використовують переважно як чутливі елементи пристроїв електричної сигналізації та автоматичного регулювання температури.

Рідинно-скляні термометри. Робочим тілом може служити ртуть, спирт, толуол, пентал тощо.

Ртутні скляні термометри виготовляють двох типів: з укладеною шкалою і паличкові. За призначенням ртутні термометри поділяють на: а) технічні (ТТ); б) лабораторні (ТЛ); в) зразкові (ТЗ).

Технічні термометри типу ТТ виготовляють з укладеною шкалою. Вони містять капілярну пряму трубку або зігнуту під кутом 90° , 120° і 135° . Нижня частина закінчується термобалоном, який у процесі вимірювання температури повністю занурюють у вимірювальне середовище.

До технічних термометрів належать також ртутно-електроконтактні термометри типу ТК, які застосовуються для сигналізації, автоматичного регулювання температур.

Лабораторні термометри типу ТЛ виготовляють як з укладеною шкалою, так і паличкові. Залежно від ціни поділки шкали та габаритних розмірів їх поділяють на чотири групи. Необхідно зауважити, що кожному термометру, який входить у труп, залежно від меж вимірювальної ним температури надають порядковий номер. До лабораторних належать і так звані калориметричний термометр, що має підвищену точність і використовується для визначення теплотворної спроможності палива.

Манометричні термометри. Складаються з термобалона, капілярної трубки і пружинного манометра. Його шкала проградуєвана у градусах. Цей прилад може бути показувальний, самозаписуючий, а також обладнаний спеціальним пристроєм для сигналізації передачі показів на віддалі.

Залежно від робочої рідини манометричні термометри поділяють на такі групи: а) рідинні (ТР) – в яких система заповнена рідиною; б) газові (ТГ) – система заповнена інертним газом; в) парові (ТП) – система заповнена легкокиплячою рідиною (етилловим спиртом, етиловим ефіром).

Електричні термометри опору. У комплект приладу входить: а) термометр опору, який є теплосприймальним давачем; б) вторичні прилади, які визначають зміну електричного опору давача (термометра опору), а саме, зрівноважуючі мости та логометри.

Термометри опору можуть бути платинові (ТОП) і мідні (ТОМ) (табл. 1.). Вони складаються з керамічної пластини та захисного кожуха. На пластину намотують платинову або мідну дротину з відповідним електричним опором.

Таблиця 1.

Параметри термометрів опору

Тип термометра	Номінальний опір, Ом	Позначення градування
ТОП	10	Гр. 20
	46	Гр. 21
	100	Гр. 22
ТОМ	53	Гр. 23
	100	Гр. 24

Окрім термометрів опору з металевих провідників (платини та міді), випускають напівпровідникові термоопори типу ММТ-4, КТМ-4. На відміну від металевих термометрів опору у напівпровідникових термооперах

нагрівання зумовлює зменшення опору. Термоопори мають малу питому електропровідність. Вони є компактні та малоінерційні.

Термоелектричні пірометри. Термоелектричні пірометри (рис. 2.) складаються з термопари і приєднаного до неї за допомогою з'єднувальних дротиків електровимірювального приладу. Термопари бувають: платино-платино-іридійові (позначають ТПП, границя вимірювання до 1300 °С), хромелькопелеві (позначають ТХК, границя вимірювання до 600 °С), платино-радійові (позначають ТПР, границя вимірювання до 1600 °С), мідь-константанові позначають ТМК з границею вимірювання до 350 °С), вольфрам-графітові та корборунт-графітові з границею вимірювання до 1800—1900 °С і хромель-алюмелеві (позначають ТХА, границя вимірювання до 1000 °С).

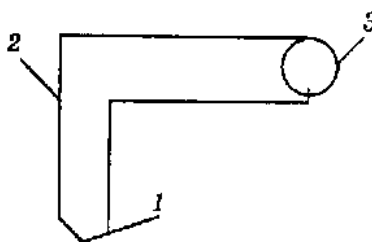


Рис. 2. Термоелектричний пірометр: 1 — гарячий спай термопари; 2 — холодні кінці термопари; 3 — прилад вимірювання.

Вимірювальним приладом може бути мілівольтметр або потенціометр. Мілівольтметри та потенціометри є показувальні та самозаписуючі для фіксування одного або кількох значень температур. Для точного вимірювання термоелектрорушійної сили (ЕРС) використовують потенціометр. Принципова відмінність потенціометра від мілівольтметра або гальванометра полягає у тому, що в момент вимірювання термопарою у колі відсутній струм, завдяки чому немає падіння ЕРС уздовж кола провідників. Різниця потенціалу на клеммах потенціометра дорівнює термо-ЕРС термопари. Виміряна мілівольтметром різниця потенціалів завжди є меншою на величину падіння напруги у колі. Тому зовнішній опір (опір термопари та з'єднувальних провідників) повинен бути таким, котрий вказаний на шкалі мілівольтметра. Величина зовнішнього опору підбирається шляхом приєднання у коло термопари додаткового опору. У процесі градування термопари гарячий спай нагрівають, а холодний спай повинен бути у середовищі з постійною температурою (як правило 0 °С). Температуру холодного спаю можна компенсувати за допомогою компенсаційної коробки. Якщо не має змоги підтримувати холодний спай термопари в середовищі з $t = 0$ °С, то в цьому випадку до показів вимірного приладу необхідно додавати температуру холодного спаю.

Між термо-ЕРС і температурою існує залежність, яка для різних термопар наводиться у градувальних таблицях. Таблиці термо-ЕРС різних термопар складені тільки для випадку, коли холодний спай є у середовищі з $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а гарячий — у вимірювальному середовищі. Тому, коли користуються градувальними таблицями термопар, необхідно враховувати також температуру холодного спаю.

Переваги термоелектричних пірометрів: великий діапазон вимірювань, висока чутливість, відсутність додаткового джерела живлення, дистанційна передача показів, порівняно висока точність вимірювання $0,02\text{—}1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Недоліки: вимірює різницю температур між гарячим і холодним спаєм.

Пірометри випромінювання. Для вимірювання температури $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$ і вище термоелектричні трометри стають непридатними, тому що руйнується метал термопар. Для вимірювання і високих температур використовують пірометри випромінювання, які поділяють на оптичні та радіаційні.

Оптичні пірометри. Найбільшого поширення набули пірометри зі зникаючою ниткою розжарення. Їх принцип дії заснований на порівнянні кольору досліджуваного середовища з яскравістю нитки розжарення пірометричної лампи, розташованої усередині приладу.

Розжарення нитки, а значить її яскравість залежить від величини струму, який проходить через неї. Величина струму регулюється реостатом. Показувальним приладом є міліамперметр, шкала якого проградуєвана у градусах.

Оптичним пірометром користуються так: об'єктив наводять на тіло, температуру якого визначають. Після фокусування телескопа у включеному в роботу приладі на фоні видно нитку розжарення. Опір реостатом змінюється так, щоб колір нитки розжарення приладу збігся з кольором тіла, температуру якого вимірюють. Коли нитка розжарення приладу зникне, тоді робиться відлік з міліамперметра, який має шкалу в $^{\circ}\text{C}$.

Перевагою цих приладів є можливість вимірювання високих температур до $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Вони можуть використовуватися також для записування значень температури. Основний недолік полягає у тому, що нулем-індикатором слугує око людини. За допомогою оптичних пірометрів вимірюється не дійсна, а так звана яскравісна температура. Для визначення дійсної температури треба вводити поправку на неповноту випромінювання тіла. З метою зменшення похибки вимірювання беруть керамічну трубку з дном 1 поміщають у середовище, температура якого вимірюється. Об'єктив пірометра наводять на дно керамічної трубки, яку можна вважати випромінювачем чорного тіла.

Радіаційні пірометри. Радіаційні пірометри працюють на основі вимірювання температури за величиною повного випромінювання тіла, тобто за тепловою дією нагрітого тіла. Для вимірювання температури об'єктів установлюється на віддалі близько 1 м від тіла і наводиться на нього. Відліки роблять за показами мілівольтметра. Межі вимірювання від 800 до 6000 °С.

Проведення лабораторної роботи

На початку проведення роботи необхідно ознайомитись з наявними у лабораторії приладами для вимірювання тиску, розрідження, різниці тисків і температури; зробити перевірку пружинного манометра, заміряти розрідження у резервуарі за допомогою рідинних і пружинних вакуумметрів, виміряти температуру у термокамері різними приладами.

Завдання 1. *Перевірка пружинного манометра.* Перевірка пружинного манометра, як було вказано вище, робиться за допомогою поршневого манометра (рис. 1.22), або масляного преса з взірцевим (контрольним) манометром.

На масляному пресі встановлено два манометри: один робочий для перевірки, другий — взірцевий (контрольний). За допомогою ручки масляного преса можна встановлювати різні значення тисків.

За допомогою ручки преса послідовно встановлюють відповідно точну величину тиску (1; 2; 3; 4; 5), яку контролюють взірцевим манометром. З манометра записують значення тиску, що відповідає встановленому. Відліки роблять у процесі послідовного збільшення величини тиску до максимального значення, та у зворотньому напрямку — зменшуючи тиск до нуля. Коли роблять відліки, рекомендується постукувати по манометру.

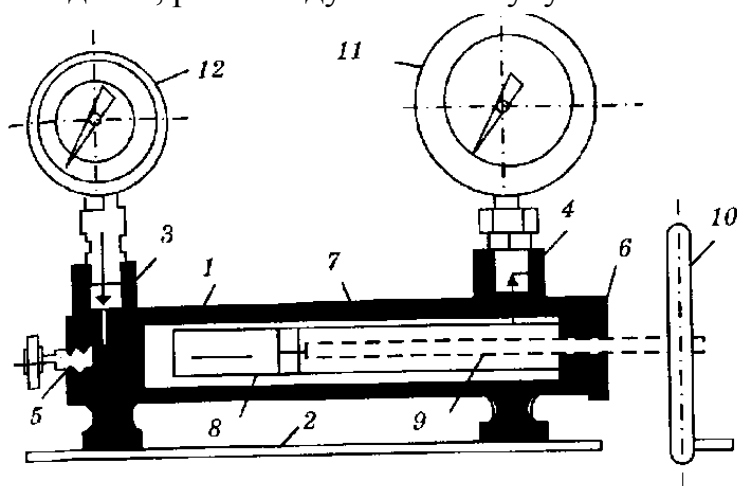


Рис. 3. Схема лабораторного станда для повірки пружинних манометрів: 1 — циліндричний корпус преса; 2 — плита; 3, 14 — штуцери; 5 — голковий вентиль; 6 — кришка; 7 — циліндр преса; 8 — поршень; 9 —

гвинтовий шток; 10 — маховик; 11 — вірцевий манометр; 12 — манометр, який перевіряється.

На основі отриманих даних визначається відсоткова похибка шляхом ділення абсолютної похибки (різниці між показами зразкового манометра і того, що перевіряється) на максимальний тиск манометра, що перевіряється, а частка множиться на 100. Відсоткова похибка манометра дозволяє зробити висновок про ступінь його придатності. Якщо максимально значення похибки є меншим від класу точності приладу, то такий манометр можна вважати придатним до роботи, а якщо більшим, то прилад переводиться в інший клас точності. У випадку, коли відсоткова похибка дорівнюватиме або перевищує чотири відсотки, манометр визнається непридатним для подальшого використання. Дані перевірки пружинного манометра заносимо у табл. 2.

Таблиця 2

Дані перевірки пружинного манометра

№ з/п	Покази вірцевого манометра, P_1	Покази манометра, який перевіряється у разі		Абсолютна похибка		Відносна похибка для	
		Збільшення тиску, P_0	Зменшення тиску, P_1	Збільшення тиску, Δ	Зменшення тиску, Δ_1	Збільшення тиску δ , %	Зменшення тиску δ , %
1.							
2.							
3.							

Абсолютна похибка $\Delta = |P_1 - P'_0|$, $\Delta_1 = |P_1 - P'_0|$, відсоткова похибка:

$$\delta = \frac{\Delta}{P_{max}} 100 \% ; \delta = \frac{\Delta_1}{P_{max}} 100 \%$$

де P_{max} - максимальний тиск, який вимірює манометром, що перевіряється.

Завдання 2. Вимірювання розрідження. Схема наведеної на рис. 1.23 лабораторної установки складається з посудини для створення розрідження (на рисунку не показана) і вимірювальних приладів: U-подібних вакуумметрів, заповнених ртуттю (2) і водою (3), мікроманометра (4) і мембранного тягоміра (5). Опускаючи посудину (1) вниз, створюється розрідження (величина вказується керівником). З показів приладів записують величину розрідження. Дані вимірювань заносять у табл. 1.90. Також заміряють температуру оточуючого середовища та барометричний тиск. На основі даних вимірювань визначають абсолютний тиск у мм. вод. ст., кПа, мм. рт. ст., кгс/см².

Барометричний тиск $P_6 =$ _____ мм рт.ст.,
 температура повітря $t_{пов.} =$ _____ °С.

Таблиця 3

№ з/п	Назва приладу	Розрідження			Абсолютний тиск			
		мм вод. ст.	мм рт. ст.	Па	мм вод. ст.	мм рт. ст.	Па	кгс/см ²

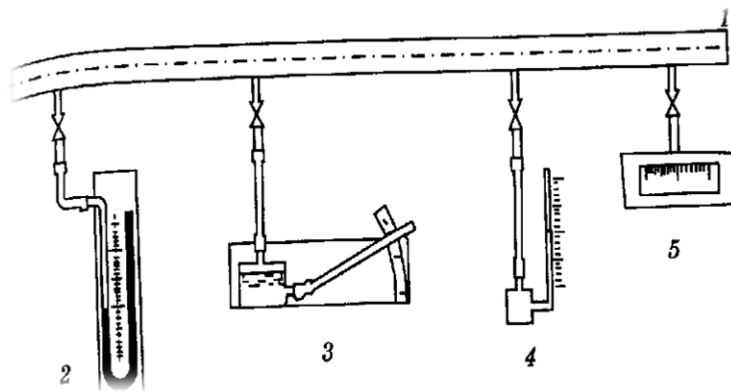


Рис. 4. Схема лабораторного стенда для вимірювання розрідження: 1 — трубопровід; 2 — U-подібний манометр; 3 — мікроманометр; 4 — чашковий манометр; 5 — мембранний тягомір

Завдання 3. Вимірювання температури за допомогою різних приладів. Для вимірювання температури нагрітої камери використовуються скляний ртутний термометр, електричний термометр опору і термопара. Електричний термометр опору приєднаний через перемикач до логометра й моста постійного струму, а термопара — до мілівольтметра та переносного потенціометра. Для компенсації температури холодного спаю термопари її підключено через компенсаційну коробку. Для визначення температури за

значенням опору, вимірюного мостом постійного струму, користуються градуювальними таблицями електрич-них термометрів опору, а для визначення температури за значенням ЕРС термопари, вимірюної за допомогою потенціометра, користуються градуювальними таблицями термопар. Дані вимірювань заносять у табл. 3.

Градуювальні таблиці наведені у довідниках для різних типів термометрів опору і термопар. Тому перед початком вимірювання температури необхідно встановити типи і градуювання приладів. Кількість вимірювань необхідно зробити за вказівками викладача і занести у табл. 1.91. Зобразити схему підключення приладів і дати висновок про переваги та недоліки вимірювання температури приладами, якими користувались.

Таблиця 4

Дані визначення

№ з/п	Скляний ртутний термометр, $t, ^\circ\text{C}$	Електричний термометр опору			Термоелектричний пірометр				
		Покази логометра, $^\circ\text{C}$	Покази моста постійного струму, Ом	Температура з таблиць, $^\circ\text{C}$	Покази мілівольтметра, $^\circ\text{C}$	Дійсна температура, $^\circ\text{C}$	Покази потенціометра, мВ	Температура з таблиць, $^\circ\text{C}$	Дійсна температура, $^\circ\text{C}$

Контрольні запитання

1. Які є одиниці вимірювання тиску?
2. Як визначається абсолютний тиск?
3. Назвіть прилади для вимірювання тиску.
4. Які ви знаєте рідинні прилади для вимірювання тиску, розріджень і різниці тисків?
5. Для вимірювання яких тисків використовуються рідинні прилади?
6. Які ви знаєте пружинні манометра?
7. Якого класу точності випускають пружинні манометри та вакуумметри?
8. Як вибирається шкала манометра?
9. Як приєднується манометр до паропроводу?
10. Як часто перевіряються манометри і порядок їх перевірок?

11. Для чого використовуються поршневі манометри?
12. Для чого використовуються електричні манометри?
13. Які є одиниці вимірювання температури?
14. Які знаєте прилади для вимірювання температури?
15. Яка границя вимірювання температури скляними рідинними приладами?
16. З чого складаються електричні термометри опору, їх принцип роботи і границя вимірювання?
17. З чого складається термоелектричний термометр? Які є термопари та границі вимірювання температур?
18. Будова і принцип дії радіаційних і оптичних пірометрів? Укажіть межу вимірювання температури цих приладів.

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

Лабораторна робота № 2

ВИЗНАЧЕННЯ ТЕПЛОЄМНОСТІ ГАЗІВ

МЕТА РОБОТИ: вивчити методику визначення теплоємності газів (повітря) та визначити об'ємну і масову теплоємності повітря для сталого тиску.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння:

ЗНАННЯ: визначення теплоємності, види теплоємності методи їх визначення, залежність теплоємності.

ВМІННЯ: визначати теплоємність різного типу.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ: лабораторна установка.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Теплоємністю речовин називають кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання речовини на один градус. У теплотехнічних розрахунках використовують питому теплоємність, що описує процес нагрівання одиниці кількості речовини на один градус. Наприклад, кількість теплоти у загальному термодинамічному процесі визначається так:

$$q = C_{xm}(t_2 - t_1), \tag{1}$$

де C_{xm} – середня питома теплоємність у довільному процесі, характеризує кількість теплоти, яка необхідна для нагрівання одиниці кількості речовини, щоб змінити температуру від t_1 до t_2 .

Звідси:

$$C_{xm} = \frac{q}{t_2 - t_1}. \quad (2)$$

Кількість речовини може бути виміряна в кг, m^3 або молях.

Теплоємність реальних речовин залежить від термодинамічного процесу підведення теплоти. У практичних розрахунках найчастіше використовують теплоємність із підвищенням теплоти за умови сталого об'єму – ізохорна теплоємність (C_V), або за сталого тиску – ізобарна теплоємність (C_P). Види теплоємностей, їх розмірності та позначення наведено у табл. 1.

Таблиця 1

Види теплоємностей та їх значення

Теплоємність	Мольна, кДж/(моль К)		Масова, кДж/(кг · К)		Об'ємна, кДж/($m^3 \cdot K$)	
	Середня	Істинна	Середня	Істинна	Середня	Істинна
Ізохорна	C_{sm} μ	C_V μ	C_{Vm}	C_V	C'_{Vm}	C'_V
Ізобарна	C_{pm} μ	C_P μ	C_{pm}	C_P	C'_{pm}	C'_P

Методика вимірювання теплоємності

Ізобарна теплоємність (C_P) має велике практичне значення. Її найпростіше визначити експериментальним шляхом. Ізохорну теплоємність (C_V) експериментально визначити важко. Тому її розраховують за формулою Маєра, а більш точно за допомогою диференціальних рівнянь термодинаміки.

Основним методом визначення теплоємності для металів, ізоляторів є метод контактної тепловимірювання. Для визначення теплоємності газів і рідини використовують два методи, а саме: нагрівання окремої порції речовини і проточним калориметром. У лабораторній роботі визначення

Повітря з постійною витратою безперервно проходить через колориметр, до якого підводиться тепло. Вимірявши кількість повітря,

кількість теплоти, температуру повітря на вході і виході з калориметра, за формулою(1) легко вирахувати значення теплоємності. Схема проточного калориметра наведена на рис. 1.

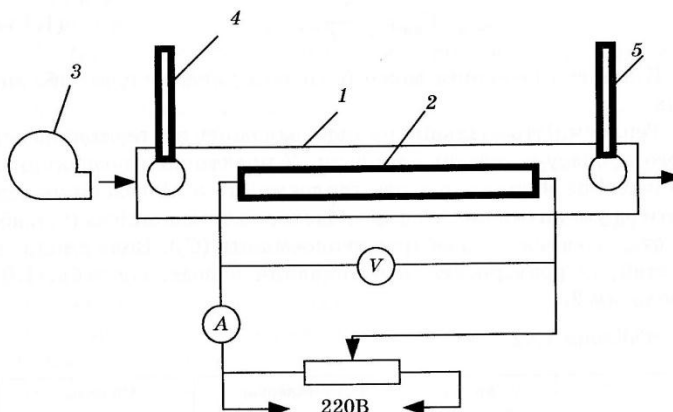


Рис. 1. Схема проточного калориметра для визначення теплоємності повітря: 1 – калориметр; 2 – електричний нагрівач; 3 – вентилятор; 4,5 – термометри

Проведення лабораторної роботи

Визначення теплоємності повітря проводимо за допомогою проточного калориметра, основою якого є труба завдовжки 1600мм, а товщина стінки $\delta=9$ мм. У калориметрі (1) розміщений електричний нагрівач (2), який виділяє тепло для нагрівання потоку повітря. Живлення нагрівача здійснюється від автотрансформатора, конструкція якого дозволяє регулювати потужність нагрівача. Вимірювання напруги U і струму у колі нагрівача здійснюється вольтметром та амперметром. Повітря за допомогою вентилятора пропускається через калориметр. Витрату повітря вимірюємо за допомогою трубки Прандтля. Температура повітря на вході і виході калориметра t_1 і t_2 вимірюється термометрами(4) і (5).

Перед дослідом необхідно включити вентилятор (3). Після цього включаємо нагрівач калориметра і регулюємо його потужність так, щоб температура повітря на виході з калориметра була більшою від його вхідної температури на $15-20^{\circ}\text{C}$. вимірювання температури на вході t_1 і виході t_2 з калориметра, а також напруги і струму починаємо проводити після встановлення теплового режиму, тобто через 8–10 хв. Вимірювання величин робимо через кожні 3 хв. протягом 12 хв. Дані вимірювань заносимо у табл. 2.

Таблица 2

Дані вимірювання

№ з/п	Температура повітря на		Покази мікроманометра, Δh , мм вод. ст.	Напруга U , В	Сила струму I , А
	вході, t_1	виході, t_2			

1.					
2.					
3.					

За середнім значенням величини $(t_1, t_2, I, U, \Delta h)$ розраховуємо середню об'ємну теплоємність повітря для сталого тиску C'_{pm} в інтервалі зміни температур від t_1 до t_2 .

‘Кількість теплоти, яка підведена до повітря за 1 с, визначається добутком сили струму на напругу.

Об'ємну витрату V_0 повітря через калориметр приведено до нормальних умов ($T_0=273$ К, $P_n=760$ мм рт. ст.):

$$V_0 = V_1 \frac{T_0 \cdot P_t}{T_t \cdot P_0} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (3)$$

$$V_t = F \cdot W = 3,48 \cdot d^2 \sqrt{\frac{\Delta h}{\rho_n}} \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

де V_1 – об'ємна витрата повітря через калориметр, для температури повітря t_n ; F – площа поперечного перерізу труби, м; W – швидкість руху повітря; d – діаметр труби калориметра, м; h – різниця тисків, виміряна трубкою Піто, мм. вод. ст.; ρ_n – густина повітря, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Знаючи об'ємну теплоємність для сталого тиску, можемо визначити середню масову теплоємність для $P=\text{const}$ цьому ж інтервалі зміни температур:

$$C_{pm} = \frac{C'_{pm} \cdot 22,4 \text{ кДж}}{\mu \text{ кг} \cdot \text{К}}, \quad (5)$$

де μ – молекулярна маса повітря, що дорівнює 28,97 $\text{кг}/\text{моль}$.

Результати обчислення записати у табл. 3:

Таблиця 3

Результати обчислення

№ з/п	Розрахункові величини	Позначення	Розмірність	Спосіб одержання	Числові значення
1.	Діаметр труби	d	М		
2.	Площа поперечного перерізу труби	F	м^2		
3.	Об'ємна витрата повітря	V_t	$\text{м}^3/\text{с}$	$3,48 \cdot d^2 \sqrt{\frac{\Delta h}{\rho_n}}$	
4.	Об'ємна витрата повітря, приведена до	V_0	$\text{м}^3/\text{с}$	$V_1 \frac{T_0 \cdot P_t}{T_t \cdot P_0}$	

	нормальних умов				
5.	Кількість теплоти, підвищена до повітря за 1 с	Q	кВт	$0,001 \cdot I \cdot U$	
6.	Середня об'ємна теплоємність для $P=\text{const}$	C_p	$\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$	$\frac{Q}{V_0(t_2 - t_1)}$	
7.	Середня масова теплоємність для $P=\text{const}$	C_p	$\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$\frac{C'_{pm} \cdot 22,4}{\mu}$	
8.	Середня масова теплоємність для $V=\text{const}$	C_v	$\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$	$C_p - C_v$	

Оцінка точності дослідних даних

Формули для визначення відносної похибки відносної теплоємності записуються так:

$$\delta C'_p = \delta I + \delta U + \delta V_t + \delta(t_2 - t_1),$$

(6)

де δI , δU , $\delta(t_2 - t_1)$, δV_t – відповідно відносні похибки у процесах вимірювань струму, напруги, температури, об'ємної витрати.

Контрольні запитання

1. Що називається “теплоємністю” та які є види теплоємності?
2. Що таке “масова”, “об'ємна” і “моральна” теплоємності?
3. У яких одиницях вимірюється теплоємність?
4. Як визначається істинна і середня теплоємності?
5. Чому теплоємність за умови постійного тиску є завжди більшою від теплоємності для стабільного об'єму?
6. Написати рівняння Майера і пояснити суть всіх величин у цьому рівнянні.
7. Як визначити середню теплоємність в інтервалі зміни температур від t_1 до t_2 , користуючись таблицями теплоємностей від 0 до $t^\circ\text{C}$?
8. Які є методи визначення теплоємності?
9. Як визначається теплоємність проточним методом?
10. Як визначити масову теплоємність суміші газів?
11. Як визначити об'ємну теплоємність суміші газів?
12. Запишіть формулу для розрахунків внутрішньої енергії та ентальпії.

13. Як перерахувати масову теплоємність в об'ємну?

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

Лабораторна робота №3 ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО ПАЛИВА

МЕТА РОБОТИ: вивчити методику експериментального визначення основних технічних характеристик палива; визначити фракційний склад, теплотворну здатність, зольність, кокс і леткі речовини для відходів деревини.

При виконанні роботи необхідно набути такі знання і вміння:

ЗНАННЯ: - види твердого палива;

- склад палива;
- теплотворна здатність;
- способи спалювання твердого палива;

ВМІННЯ: - розрізняти тверді палива;

- визначати склад палива;
- складати схеми способів спалювання твердих палив.

ОБЛАДНАННЯ І МАТЕРІАЛИ: зразки твердого палива (кокс, кам'яне вугілля, деревина), приладдя для визначення основних характеристик твердого палива, набір сит, електричні ваги, фарфоровий тагель, калориметр юнкерса, калориметрична бомба (ємність)

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

Для виконання теплових розрахунків процесу горіння палива в палильному пристрої необхідні числові значення його технічних характеристик. До них відносяться: фракційний склад, елементарний склад робочої маси палива, вміст коксу і летких речовин, теплотворна здатність ,

температура згоряння та інші. Вищеназвані характеристики також необхідні при розрахунку викиду шкідливих речовин, утворених при спалюванні палива, в доквілля, а також при оцінці ефективності роботи золоуловлювачів й інших очисних газових пристроїв.

Одним із способів визначення гранулометричного складу здрібненого палива й золи є сітковий метод. Він базується на механічному розділенні частинок за їх величиною з допомогою сита. Матеріал, який потрібно дослідити, висипають на сито з відомими розмірами комірки і струшують. Отримані результати поділяють на залишок і те, що пройшло. Використовуючи набір сит, можна розділити пробу палива на декілька фракцій. Просіювання проб подрібненого матеріалу проводять вручну або механічним методом з допомогою спеціальних машин просіювання. Просіювання проводять як прямим, так і зворотнім способом. При прямому способі сита розміщують так: згори — з найбільшими розмірами комірки, а знизу – найменші. У цьому випадку проходить просіювання частинок за розмірами по всьому набору сит.

При зворотньому способі найменше сито є верхнім, а найбільше внизу. Отримані залишки під час просіювання на найменшому розмірі сит перекладають на більші. Така послідовність сприяє процесу просіювання на найбільш тонких ситах і застосовується для очистки пилу, який має здатність злипатися в тонких фракціях.

Для ситового аналізу використовують набір стандартних сит. Сито – циліндр заввишки 0,05 м, діаметром 0,2 м, де з однієї сторони поміщається сітка з термічно обробленої дротини сплаву кольорових металів. Під розміром сита розуміють довжину сторони квадратної комірки. Середній арифметичний розмір X сторони комірки сита визначається так:

$$X = \frac{L}{n} - d,$$

де d – діаметр дротини сита; n – число комірок на довжину ділянки L .

Сита щільно встановлюють одне на друге. Набір сит знизу закривається піддоном, а зверху – кришкою. Співвідношення попереднього розміру комірки сита до наступного називають модулем набору.

Набір сит підбирається у співвідношенні з розмірами частинок досліджуваного палива. У лабораторній роботі використовується набір стандартних сит з розмірами комірки 1,6; 1,0; 0,5; 0,2; 0,09 мм.

Машинне розсіювання виконується за допомогою машини розсіювання. Набір сит закріплюють на столі машини. Стіл при просіюванні здійснює обертовий та обертово-поступальний рух.

Кількість пилу, яка відбирається для проведення ситового аналізу, залежить від її густини. Пропонується взяти пробу об'ємом не більше 100 см³ (або масою 20...25 г), зважити її з точністю до 0,01 г. При машинному просіюванні його тривалість необхідно встановити експериментально. Чим менше сито, тим більша тривалість просіювання, тому що збільшується кількість частинок і зменшується сила гравітації. Просіювання можна вважати закінченими, коли залишок на ситі зменшується більше ніж на 0,2 % протягом двох хвилин. До встановлення робочих показників тривалість машинного просіювання має дорівнювати 20...25 хв. незалежно від типу машини. Для доброго й економічного просіювання матеріалу пропонується така тривалість (табл. 1).

Таблиця 1

Рекомендована твердість просіювання

Розмір сита, мм	0,04...0,063	0,071...0,16	>0,16
Тривалість просіювання, хв.	30...20	19...10	9...5

Ручне просіювання проводять методом перекидання сита з однієї руки в другу з частотою близько 120 ударів за хв., при цьому через кожні 40 ударів сито повертають на 90° в горизонтальній площині і вдаряють по обичайці сита рукою. Після закінчення просіювання сито обстукують, залишений пил висипають для зважування, при цьому акуратно очищають сито. Також після закінчення просіювання для контролю чистоти дна сито знімають і роблять десять перекодувань його над листочком білого паперу (про закінчення просіювання свідчить випадання окремих частинок).

З метою підвищення достовірності результатів просіювання необхідно робити два досліди, при цьому відмінність між ними не повинна перевищувати ± 1 %. У випадку наявності вологого пилу необхідно проводити підсушування проби палива в сушильній шафі при температурі 55...65 °С до повітряно-сухого стану.

Зола в паливі залежно від умов утворення змінюється від 5 - 7 % до 35 - 40 % і вище. Вона складається з мінеральних домішок (глинозем, кремнезем, сульфати і карбонати кальцію, а також лужні, хлорні й інші з'єднання). Ці домішки діляться на легкоплавкі, тугоплавкі та не шлакувальні.

Наявність великої кількості золи ускладнює експлуатацію парогенератора. Якщо зола легкоплавка, то при згорянні палива заливає

проміжки для проходження повітря в колосникових решітках, прилипає до обмурівок палилень котла, руйнуючи їх, а також шлакує дно. Тому характер і поведінка золи під час згоряння палива значно впливають на тип конструкції палильні.

Уміст золи в паливі визначають так: зважену кількість палива в тигельках поміщають в холодну муфельну пічку, яку поступово нагрівають до температури 500-900 °С. Знаючи масу золи після згоряння палива, її процентний

вміст визначають за формулою:

$$A^c = \frac{M}{a} * 100\%$$

де М — маса золи в г; а — маса палива в г.

Волога W у паливі коливається від 3—5% до 60—70%, яка залежить від багатьох причин, серед яких не останньою є хімічний вік палива.

Розрізняють вологу зовнішню і внутрішню, або гігроскопічну. До зовнішньої належить волога, що попадає в паливо під час його добування, зберігання і транспортування. Її вміст може бути порівняно легко віддалений методом висушування.

Гігроскопічна, або колоїдна вологість палива залежить від його структури і зв'язків з органічними речовинами та мінеральними домішками.

Волога є небажаною складовою тому, що зменшує частку горючих елементів в одиниці маси. Крім того, при спалюванні палива частина тепла витрачається на її випаровування.

Вологість палива може бути визначена методом зважування, який полягає в тому, що проба палива зважується, після чого висушується в сушильній шафі при температурі 95 – 105 °С до того часу, поки маса між двома послідовними зважуваннями не буде на 0,3% відрізнятися від маси висушеного зразка.

$$W = \frac{g - a}{g} * 100\%,$$

де g – маса проби палива до сушіння, г; а – маса палива після сушіння, г.

Коли паливо нагрівають без доступу повітря при високій температурі (200 - 800 °С), починається його термічне розкладання на газоподібну частину – леткі речовини і твердий залишок – кокс. Леткі речовини без урахування водяної пари, що утворюються в результаті випаровування вологи нагрітого палива, складаються з H₂, CH₄, CO, C_nH_m, N₂. Вихід летких речовин, їх якісний склад, а також температура, з якої вони починають виділятися, коли інші умови є однакові, залежить від хімічного віку палива. Так, чим паливо хімічно старше, тим менший вихід летких речовин і вища

температура початку їх виділення. На кількість і склад летких речовин одного і того ж палива сильно впливають умови нагрівання і температура, при якій проходить процес розкладу.

Леткі речовини мають великий вплив на процес горіння палива. Паливо з великим виходом летких речовин, наприклад торф, буре вугілля, деревина й інші, легко загоряється, згоряє швидко і повністю (з малою втратою тепла). Навпаки, паливо з малим виходом летких речовин, наприклад, антрацит, загоряється значно трудніше, горить повільніше і повністю не згоряє.

Їх уміст у паливі має основне значення при розрахунку палильні. Якщо летких речовин є багато в паливі, тоді палильня повинна мати достатній об'єм для його повного згорання. У випадку малої їх кількості у паливі все повітря використовується для горіння коксу, що призводить до підвищення температури, перепалення колосників та їх шлакування.

У стверділому залишку палива – коксі знаходиться частина вуглецю і золи. Кокс може бути порошкоподібним, сплавленим, спеченим, злиплим.

Для визначення кількості речовини і коксу пробу масою 1,5 — 2 г поміщають у фарфоровий або кварцовий тигель, закривають кришкою і зважують. Після цього тигель поміщають в електричну піч, температура якої 800 — 1000 °С, і нагрівають протягом 7 хвилин, після чого тигель виймають і зважують. Віднімаючи масу тигля, визначають масу коксу M_k .

Уміст коксу в паливі визначається за формулою:

$$K = \frac{M_k}{a} * 100\%,$$

де M_k – маса проб без тигля після нагрівання, г; a – маса палива без тигля перед прожарюванням, г.

Кількість летких речовин разом з вологістю визначають за формулою:

$$V_l^p = 100 - K\%.$$

Уміст летких речовин (горючих):

$$V_l^e = V_l^p - W^p\%.$$

Теплотворна спроможність показує ту кількість теплоти, яка виділяється при повному спалюванні одиниці палива (кг або м³). Теплотворна спроможність може бути вищою (Q_B^p) і нижчою (Q_H^p).

Нижча теплотворна спроможність палива показує ту кількість теплоти, яка виділяється при повному спалюванні одиниці палива з урахуванням теплоти конденсації водяної пари.

Вища теплотворна спроможність палива показує ту кількість теплоти, яка виділяється при повному спалюванні одиниці палива без урахування теплоти конденсації водяної пари.

Знаючи вищу теплотворну спроможність палива, нижчу теплотворну спроможність палива можна визначити за рівнянням:

$$Q_n^p = Q_p^e - q_n \text{ кДж/кг},$$

де q_n — теплота конденсації теплової пари, кДж/кг.

Теплотворна спроможність палива може бути визначена лабораторним шляхом. Для твердого і рідкого палива її визначають за допомогою калориметричної бомби. Суть цього методу в тому, що пробу палива спалюють у ємності (бомбі), яка встановлена в калориметричну посудину з водою. За підвищенням температури води в калориметричній установці визначають теплотворну спроможність твердого або рідкого палива.

Теплотворну спроможність газоподібного і рідкого палива визначають за допомогою проточного калориметра Юнкерса.

Принцип дії полягає в тому, що паливо, згоряючи, виділяє тепло, яке передається по воді що протікає через калориметр. Знаючи кількість теплоти, яку вода отримала, протікаючи через калориметр, та кількість спаленого палива, теплотворну спроможність визначають так:

$$Q_n^p = \frac{Q_v}{G_n},$$

де Q_v — кількість теплоти, що отримала вода; G_n — кількість спаленого палива.

Завдання 1. *Визначення фракційного складу деревинного пилу ситовим методом.*

Порядок виконання роботи:

1. Вивчити питання, як береться проба палива (шлаку або золи), а також методику приготування проб до лабораторних дослідів; ознайомитись з пристроями та конструкціями для відбору проб палива з аеродинамічного потоку.
2. Вивчити з допомогою мікроскопа неоднорідність фракцій лабораторних проб палива (шлаку, золи).
3. Приготувати дві проби палива (шлаку, золи) для ручного або механічного просіювання в кількості 25...80 г, зваживши їх з точністю 0,01 г.
4. Перевірити правильність розташування сит у наборі (за розмірами) і висипати пробу на верхнє сито. Закрити набір сит кришкою.
5. При машинному розсіюванні закріпити набір сит на столі і включити її за допомогою пускової кнопки (тривалість розсіювання задається за допомогою реле часу).
6. Після розсіювання залишки на кожному ситі зважити з точністю 0,01 г. Підсумувати всі залишки та визначити сумарні втрати пилу (якщо

втрати перевищують 2 % від початкової проби, розсіювання повторити з новою пробую).

7. Розрахувати фракційні та повні залишки на ситах, побудувати гістограму й інтегральну зернову характеристику пилу,

8. Розрахувати значення $\lg \ln (100/R_x)$ $\lg X$ для дослідних точок і побудувати їх у цих координатах. Визначити інтервал придатності формули Розіна - Рамлера за розмірами частинок пилу, що аналізується.

9. Визначити значення коефіцієнтів «b» і «n» і записати співвідношення Розіна – Рамлера з числовими коефіцієнтами.

10. Розрахувати за одержаним рівнянням значення повних домішків і побудувати розрахункову інтегральну зернову характеристику пилу на одному графіку з дослідною інтегральною кривою.

Порівняти інтегральні криві (дослідну та розрахункову) і визначити максимальні відхилення ΔR розрахункових величин від дослідних.

Результати вимірювання і розрахунків необхідно оформити у вигляді табл. 2:

Таблица 2

Результати вимірювання фракційного складу деревного палива

G_n , г	X , мм	q , г	F , %	$\sum_r^n q$	R , %	$\lg X$	$\lg \ln \frac{100}{R}$	$R_{\text{рогр}}$, %	ΔR , %

Обробка результатів дослідження

Після просіювання на кожному ситі є залишок частинок, розміри яких знаходяться в межах цього і вищележачого сит. Позначимо розміри комірки найбільшого сита через x_1 , а наступні відповідно x_1, x_2 і т. д. Визначивши масу залишку на кожному ситі (g_1, g_2, g_3 і т. д.) і записавши її у відсотках від початкової маси проби визначаємо фракційні залишки:

$$F = \frac{g_i}{gG_n} 100\%.$$

Отримані результати можна показати у вигляді гістограми розподілу складу пилу (рис. 1) або у вигляді таблиці.

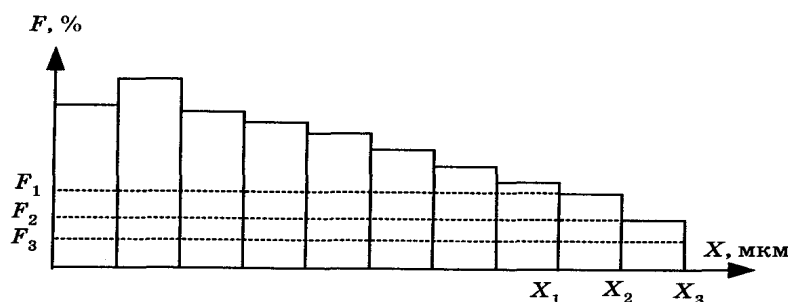


Рис. 1. Гістограма розподілу фракційного складу пилу

У дисперсному аналізі найпоширенішого використання отримали інтегральні і диференціальні зернові характеристики пилу.

Інтегральна зернова характеристика (крива повних залишків) $R=f(x)$ показує частку частинок, що мають розмір, більший від X , а характеристика $D=f(x)$ – похідна частка частинок, що мають розмір, більший за X . Для будь-якого сита справедливе співвідношення $R_i + D_i = 100$. При ситовому аналізі для розрахунку повних залишків використовують співвідношення:

$$R_i = \frac{\sum_1^n g}{G} \cdot 100\%.$$

На базі одержаних значень і враховуючи, що через сито з нульовим розміром комірки пил взагалі не проходить (коли $X=0$; $R=100\%$), $R=f(x)$. За цим графіком оцінюють значення повного залишку пилу на ситі будь-якого розміру.

Для характеристики гранулометричного складу пилу в деяких випадках використовуються повними залишками на ситах R_{90} , R_{200} , R_{1000} інші, що найчастіше застосовуються.

При теоретичних розрахунках вигоряння палива є необхідність у функціональному описі одержаних експериментально зернових характеристик пилу. Такою функціональною залежністю є співвідношення Розіна – Рамлера:

$$R = 100 \cdot e^{-b}$$

де b – сталий коефіцієнт, який характеризує, наскільки тонко подрібнені частинки; n - рівномірність зернового складу (полідисперсність, тобто структурний склад пилу).

Аналізуючи співвідношення (3.106), бачимо, що чим більше b , тим дрібніші (тонші) частинки пилу; коли $b \rightarrow \infty$, тоді $R \rightarrow 0$, а коли $b \rightarrow 0$, тоді $R \rightarrow 100\%$.

Коефіцієнти « b » і « n » визначають так: використовуючи залежність (3.106), записуємо два рівняння з двома невідомими:

$$\frac{100}{R_1} = e^{bx_1^n}; \frac{100}{R_2} = e^{bx_2^n}.$$

Виконаємо математичну операцію логарифмування два рази, тобто спочатку беремо натуральний, а після цього десятковий логарифм, й одержимо:

$$\begin{aligned} \lg \ln \frac{100}{R_1} &= \lg b + \ln x_1, \\ \lg \ln \frac{100}{R_2} &= \lg b + \ln x_2. \end{aligned}$$

Провівши відповідні математичні перетворення, отримаємо:

$$n = \frac{lg \cdot \ln \frac{100}{R_1} - lg \cdot \ln \frac{100}{R_2}}{lgx_1 - lgx_2}.$$

Якщо взяти найбільш поширені сита 200 і 90 мкм, для яких $X = 200$ мкм, а $X_2 = 90$ мкм ($x_1 > x_2$) і відповідно $R_1 = R_{200}$, $R_2 = R_{90}$, то одержимо:

$$n = 2,881g \frac{2 - lg_{200}}{2 - lg_{90}},$$

$$a \lg b = \lg \ln \frac{100}{R_1} - n \lg X_1$$

Завдання 2. Визначення зольності палива (відходів деревини).

Для визначення зольності, подрібнену пробу палива (1,5 – 2 г) насипають тонким шаром у тигель, маса якого відома і зважується на аналітичній вазі з точністю до 1 мг. Паралельно відбирається ще одна проба палива, засипається у другий тигель і зважується. Тигель з пробною палива поміщають у холодну електричну піч, яка після цього включається, температура в печі піднімається до 550 °С. При цій температурі проба палива спалюється, після чого тигель виймають, охолоджують і зважують. Дані записують у табл. 3. Якщо зольність палива, визначена за двома пробами, буде однаковою або буде відрізнятися на незначну величину, тоді дослід вважається дійсним.

Таблиця 3

Дані визначення залежності відходів деревини

№ з/п	Назва	Позначення	Розмірність	Розрахунок співвідношення	Числові значення	
					Проба 1	Проба 2
1	2	3	4	5	6	7
1.	Маса порожнього тигля	M_1	г	—		
2.	Маса тигля а пробою	M_2	г	—		
3.	Маса палива до зважування	M_3	г	$M_2 - M_1$		
4.	Маса тигля із золою	M	г	—		
5.	Маса золи	a	г	$M_3 - M_1$		
6.	Вміст золи в паливі на	A^c	%	$M_3/a * 100$		
1	2	3	4	5	6	7
7.	Зольність палива на робочу масу	A^p	%	$A^c * (100 - W^p)/100$		

Завдання 3. Визначення вмісту летких речовин та коксу в паливі.

Кількість летких речовин і коксу визначається в такій послідовності: в тигель, напередодні зважений з точністю до 1 мг, засипається в

порошкоподібному вигляді проба палива (1,5+2г) і знову зважується на аналітичних терезах з точністю до 1мг. Після чого закривається легкою покриткою та вставляється в електричну піч, де при температурі 850 °С витримують протягом 7 хвилин. Далі тигель виймається, охолоджується і знову зважується на аналітичних терезах. Дані заносять у табл. 4. Дослід проводиться одночасно з двома пробамі.

Таблиця 4

Дані вмісту летких речовин і коксу в паливі

№ з/п	Найменування	Позначення	Розмірність	Розрахункові формули	Числові значення	
					Проба 1	Проба 2
1.	Вид палива					
2.	Маса порожнього тигля з кришкою	M_1	г			
3.	Маса тигля з паливом і покриткою	M_2	г			
4.	Маса палива до гартування	a	г			
5.	Маса тигля з кришкою і коксом після гартування	M_3	г	$M_2 - M_1$ $M_3 - M_1$		
6.	Маса коксу	M_k	г			
7.	Вміст коксу в паливі	K^k	%	$M_k/a * 100$		
8.	Кількість летких речовин (з вологістю)	V^p	%	$100 - K$		
9.	Вміст летких речовин у паливі	V^p	%	$V^p - W^p$		

Завдання 4. Визначення теплотворної спроможності твердого палива.

Визначення теплотворної спроможності твердого палива методом спалювання проби в калориметричній бомбі проводиться в такій послідовності:

а) зважити запалюючу дротину. За допомогою преса зробити брикет палива масою 0,8-1,4 г із запалювальною дротиною;

б) визначити вагу досліджуваного брикету палива з запалюючою дротиною;

в) встановити брикет палива у бомбу, закрити її і заповнити киснем під тиском 1,5-3,0 МПа;

г) встановити в калориметричну посудину з водою бомбу, мішалку і термометр. Під'єднати до струмопідвідних штифтів бомби електричні провідники від джерела живлення;

г) після включення мішалки в роботу через 3-5 хв. починають робити виміри температури за термометром (10 відліків через кожні 30 с) – це є початковий період;

д) на 11 відліку включають напругу для розжарення запалюючої дротини, внаслідок чого загоряється проба палива. Вимірювання температури продовжують робити через кожні 30 с цим же термометром – температура зростає. Роблять вимірювання доти, доки не встановиться постійна температура – це є головний період;

е) після встановлення максимального приросту величини температури її значення почне опускатися вниз, при цьому необхідно зробити ще 10 вимірювань через 30 с – кінцевий період.

Результати заносять у журнал спостережень (табл. 5)

Дані визначення теплотворної здатності твердого палива

№ з/п	Найменування	По-значення	Розмірність	Розрахункові формули	Числові значення
1	2	3	4	5	6
1.	Вологість аналітичної проби палива	W^a	%		
2.	Вологість робочого палива	W^p	%		
3.	Вміст водню в робочому паливі	H^p	%		
4.	Маса проби палива	g	г		
5.	Маса запалювальної дротини	b	г		

1	2	3	4	5	6
6.	Число відліків у головному періоді	n	—		
7.	Число значень температури при підвищенні понад 0,3 °С	m	—		
8.	Число інших значень головного періоду	e	—	$n - m$	
9.	Середня величина різниці температури між сусідніми значеннями початкового періоду	τ_1	°С		
10.	Середня величина різниці температури між сусідніми відліками кінцевого періоду	τ_2	°С		
11.	Поправка на теплообмін калориметричної установки	Δt	°С	$n \cdot \tau + \frac{\tau_1 + \tau_2}{2} (m + 2)$	
12.	Теплотворна спроможність аналітичної проби палива по бомбі	Q_s^a	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{k(t_2 - t_0 + \Delta t) \cdot b \cdot g}{g}$	
13.	Вища теплотворна спроможність аналітичної проби	Q_b^a	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_s - 0,001Q - 945S^p$	
14.	Вища теплотворна спроможність робочого палива	Q_n^a	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_b^a \cdot \frac{100 - W^p}{100 - W^a}$	
15.	Нижча теплотворна спроможність робочого палива	Q_n^p	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_n^p - 25 \cdot (9H^p + W^p)$	

Завдання 5. Визначення теплотворної спроможності рідкого палива.

Теплотворна спроможність рідкого палива визначається за допомогою калориметра.

Порядок роботи:

- 1) включити воду для проходження через калориметричну установку;
- 2) запалити лампу газифікації, встановити її пальник у камеру згоряння калориметра і підвісити лампу на один важіль терезів;
- 3) для збору конденсату, що утворюється під час спалювання палива, необхідно поставити під патрубок посудину;
- 4) зрівноважити терези;
- 5) після встановлення постійної температури води при виході з калориметра почати дослід, тобто встановлюють на одну з терезів гирю вагою 10 г і починають збирати воду, яка виходить з калориметра. Вимірювання температури води при вході та виході з калориметра проводять через кожні 30 с. Тривалість досліду — час горіння 10 г палива. Кінець досліду буде тоді, коли стрілка терезів знову стане в положення «0». Дані заносяться в журнал спостережень (табл. 6):

Таблиця 6

Журнал спостережень

Паливо _____
Кількість зібраної води G_v _____
Кількість конденсату G_n _____

№ з/п	Температура води, °С	
	На вході t_1 , °С	На виході t_2 , °С
Середнє значення		

Результати обчислень занести в табл. 7

Дані визначення теплотворної здатності рідкого палива

№ з/п	Найменування	Позначення	Розмірність	Розрахункові формули	Числові значення
1.	Різниця температур	Δt	°С	$t_2 - t_1$	
2.	Кількість зібраної води	G_n	кг		
3.	Кількість спаленого палива	G_n	кг		
4.	Вища теплотворна спроможність палива	Q_b^p	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{G_n \cdot C_p \cdot \Delta t}{G_n}$	
5.	Теплота конденсації водяної пари	q_k	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{2500 \cdot G_k}{G_n}$	
6.	Нижча теплотворна спроможність палива	Q_n^p	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_b^p - q_k$	

Завдання 6. *Визначення теплотворної спроможності газоподібного палива.*

Визначається за допомогою проточного калориметра.

Порядок роботи:

- 1) заповнити калориметричну установку поворотом крана «С»;
- 2) запалити газовий пальник і всипати його в камеру згорання калориметра;
- 3) поставити під патрубок посудину для збору конденсату, що виділяється під час конденсації водяної пари.

Після встановлення сталої температури води на виході з калориметра почати дослід: збирати воду, яка виходить з калориметра (повернути кран «С»), зробити відлік значення на газовому лічильнику, а також вимірювати через кожні 30 с температуру води на вході та виході з калориметра. Отримані значення заносяться в журнал спостережень (табл. 8)

Журнал спостережень

паливо _____

температура газу в лічильнику t_1 _____ °С

тиск газу в лічильнику P_2 _____ мм рт. ст.

кількість зібраної води G_n _____ кг

кількість конденсату G_k _____ кг

покази газового лічильника: на початку _____
в кінці _____

Барометричний тиск $P_6 =$ _____ мм рт. ст.,
температура повітря $t_{\text{пов.}} =$ _____ °С.

№ з/п	Температура води, °С	
	На вході t_1 , °С	На виході t_2 , °С
1.		
2.		
3.		
Середнє значення		

Таблиця 9

Результати обчислень

№ з/п	Найменування	Позначення	Розмірність	Розрахункові формули	Числові значення
1.	Тиск водяної пари для температури повітря	P_n	мм рт. ст.	За таблицею для насиченої пари	
2.	Абсолютний тиск сухого повітря	P	мм рт. ст.	$B_0 + P_n$	
3.	Коефіцієнт приведення об'єму газу до нормальних умов	f		$\frac{760 \cdot T}{273 \cdot P}$	
4.	Тепло конденсації водяної пари	q_n	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{2500 \cdot G}{G_n \cdot f}$	
5.	Кількість спаленого палива під час досліду	G_n	літрів		
6.	Вища теплотворна спроможність палива	Q_n^p	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$\frac{G_n \cdot C_p (t_2 - t_1)}{G_n \cdot f}$	
7.	Нижча теплотворна спроможність палива	Q_n^p	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_n^p - q$	
8.	Теплотворна спроможність палива, приведена до нормальних умов	Q_n^p	$\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	$Q_n^p = Q_n^p \cdot f$	

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

- 1.* У чому суть ситового методу визначення гранулометричного складу?
- 2.* Чим відрізняються фракційні залишки від повних?
- 3.* Фізична суть коефіцієнтів β і ρ .
- 4.* Записати формулу Розіна – Рамлера.
- 5.* Класифікація палива і його характеристики.
- 6.* Як записується елементарний склад робочої, сухої і горючої маси палива?
- 7.* Як визначаються вологість і зольність палива?
- 8.* Що входить до складу золи, коксу, летких речовин?
- 9.* Як визначається вміст коксу і летких речовин?
- 10.* Яка різниця між вищою і нижчою теплотою згоряння палива?
- 11.* Методика визначення теплотворної спроможності твердого та рідкого палива.
- 12.* Що таке “умовне паливо”?

ЗВІТ ПРО РОБОТУ

ЛІТЕРАТУРА

1. Беляев Н. М. Термодинамика. — К.: Высш. шк. — Главное изд-во, 1987. — 344 с.
2. Брдлик П.М., Морозов А.В., Семенов Ю.П. Теплотехника и теплоснабжение лесной и деревообрабатывающей промышленности. — М.: Лесн. пром-сть, 1988. — 456.
3. Задачник по технической термодинамике и теории тепломасообмена / Под ред. В. И. Крутова, Г. Б. Петражицкого. — М.: Высш. шк., 1986. — 383 с.
4. Зубарев В. Н., Александров А. А., Охотин В. С. Практикум по технической термодинамике. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 304 с.
5. Костенко Г. М. Технічна термодинаміка. — К.: Державне видавництво технічної літератури, 1958. — 419 с.
6. Лабай В.Й. Теплообмін: Підручник для ВНЗ. — Л.: Тріада плюс, 1998. — 260 с.
7. Мисак Й. С., Гнатишин Я.М., Близнюк В.Ф. та ін. Пристрої для утилізації теплової енергії. — Л.: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2006. — 152 с.
8. Мисак Й. С., Гнатишин Я. М., Івасик Я. Ф. Паливні пристрої для спалювання низькосортних палив: Навч. посіб. — Л.: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2002. — 136 с.
9. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. — М.: Высш. шк., 1980. — 469 с.
10. Орехов И. И., Обрезков В. В. Холод в процессах химической технологии. — Л.: Изд-во ЛГУ, 1980. — 256 с.
11. Практикум по теплопередаче: Учеб. пособ. для вузов / Под ред. А. П. Соподова. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 296 с.
12. Рабинович О. М. Сборник задач по технической термодинамике. — М.: Машиностроение, 1973. — 344 с.
13. Соколов Е. Я., Бродянский В. М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения. — М.: Энерго-издат, 1981. — 320 с.
14. Теплотехніка / За ред. Б. Х. Драганова, О. Ф. Буляндри. — К.: Вища шк., 1998. — 334 с.
15. Техническая термодинамика / Под ред. проф. Э. И. Гуйго. — Л.: Изд. Ленингр. ун-та, 1984. — 296 с.
16. Тихомиров К. В. Теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция. М.: Стройиздат, 1981. — 271 с.

17. ХаникЯ. М., Гнатишин Я. М. Энергозбереження: Частина 1 "Термодинаміка". – Л., 2004. – 125 с.

18. Эксергетические расчеты технических систем: Справ.пособие / Под ред. А. А. Долинского, В. М. Бродянского. – К.: Наук, думка, 1991. — 360 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

Основні фізичні властивості газів

Назва	Формула	Молекулярна маса, кг/кмоль	Густина, коли $t=0^{\circ}\text{C}$ і $P=101,3$ кПа, кг/м ³	Теплота випаровування для $P=101,3$ кПа, кДж/кг	$k = C_p/C_v$	Питома теплоємність для $t = 20^{\circ}\text{C}$ і $P=101,3$ кПа кДж/(кг·К)	
						C_p	C_v
Азот	N ₂	28,0	1,25	199,4	1,40	1,05	0,746
Аміак	NH ₃	17,0	0,77	1374,0	1,29	2,22	1,68
Аргон	Ar	39,9	1,78	163,0	1,66	0,53	0,323
Ацетилен	C ₂ H ₂	26,0	1,171	830,0	1,24	1,68	1,36
Бензол	C ₆ H ₆	78,1	—	394,0	1,1	1,25	1,140
Бутан	C ₄ H ₁₀	68,1	2,673	387,0	1,08	1,92	1,80
Водень	H ₂	2,02	0,0899	455,0	1,407	14,3	10,14
Гелій	He	4,0	0,179	19,5	1,66	5,28	3,18
Двоокис азоту	NO ₂	46,0	—	712,0	1,31	0,804	0,62
Двоокисвуглецю	CO ₂	44,0	1,98	574,0	1,30	0,838	0,654
Двоокис сірки	SO ₂	64,1	2,93	394,0	1,25	0,633	0,503
Етан	C ₂ H ₆	30,1	1,36	486,0	1,20	1,73	1,45
Етилен	C ₂ H ₄	28,1	1,26	482,0	1,20	1,53	1,26
Кисень	O ₂	32,0	1,429	213,0	1,4	0,913	0,654
Метан	CH ₄	16,0	0,72	511,0	1,31	2,23	1,70
Окис вуглецю	CO	28,0	1,25	212,0	1,40	1,05	0,754
Пентан	C ₅ H ₁₂	72,2	—	360,0	1,09	1,72	1,58
Повітря	—	29,0	1,293	197,0	1,4	1,01	0,721
Пропан	C ₃ H ₈	44,1	2,02	427,0	1,13	1,87	1,65
Пропілен	C ₃ H ₆	42,1	1,91	440,0	1,17	1,63	1,44
Сірководень	H ₂ S	34,1	1,54	549,0	1,30	1,06	0,804
Хлор	Cl ₂	70,9	3,22	306,0	1,36	0,482	0,355
Хлористий метил	CH ₃ Cl	50,5	2,3	406,0	1,28	0,742	0,582

Середнямолярна теплоємність при сталомутиску μC_p , кДж / (моль • К)

$t, ^\circ\text{C}$	O_2	N_2	CO	CO_2	H_2O	SO_2	Повітря
0	29,274	29,019	29,123	35,860	33,499	38,85	29,073
100	29,538	29,048	29,178	38,112	33,741	40,65	29,152
200	29,931	29,132	29,303	40,059	34,118	42,33	29,299
300	30,400	29,287	29,517	41,755	34,575	43,88	29,521
400	30,878	29,500	29,789	43,250	35,090	45,22	29,789
500	31,334	29,764	30,099	44,573	35,630	46,39	30,095
600	31,761	30,044	30,425	45,453	36,195	47,35	30,405
700	32,150	30,341	30,752	46,813	36,789	48,23	30,723
800	32,502	30,635	31,070	47,763	37,392	48,94	31,028
900	32,825	30,924	31,376	48,617	38,008	49,61	31,321
1000	33,118	31,196	31,665	49,392	38,619	50,16	31,598
1100	33,386	31,455	31,937	50,099	39,226	50,66	31,862
1200	33,633	31,707	32,192	50,740	39,825	51,08	32,109
1300	33,863	31,941	32,427	51,322	40,407	—	32,343
1400	34,076	32,163	32,653	51,858	40,976	—	32,575
1500	34,282	32,372	32,858	52,348	41,525	—	32,774
1600	34,474	32,565	33,051	52,800	42,056	—	32,967
1700	34,658	32,749	33,231	53,218	42,576	—	33,151
1800	34,834	32,917	33,402	53,504	43,070	—	33,319
1900	35,006	33,080	33,561	53,959	43,539	—	33,482
2000	35,169	33,231	33,708	54,290	43,995	—	33,641

Насичена пара і вода на лінії насичення

P_n , мПа	t_n , °C	ϑ' , $\frac{м^3}{кг}$	ϑ'' , $\frac{м^3}{кг}$	i' , $\frac{кДж}{кг}$	i'' , $\frac{кДж}{кг}$	r , $\frac{кДж}{кг}$	S' , $\frac{кДж}{кг \cdot K}$	S'' , $\frac{кДж}{кг \cdot K}$
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,10	99,62	0,0010432	1,696	417,47	2674,9	2257,5	1,3026	7,3579
0,12	104,80	0,0010472	1,430	439,34	2683,0	2243,6	1,4610	7,2972
0,14	109,31	0,0010509	1,237	458,42	2690,1	22,317	1,4109	7,2460
0,16	113,31	0,0010543	1,092	475,41	2696,3	2220,8	1,4550	7,2017
0,18	116,93	0,0010575	0,978	490,68	2701,8	2211,1	1,4945	7,1628
0,20	120,23	0,0010606	0,886	504,74	2706,8	2202,0	1,5306	7,1279
0,22	123,27	0,0010633	0,810	517,7	2711,0	2193,3	1,5632	7,0953
0,24	126,09	0,0010659	0,746	529,9	2714,9	2185,0	1,5931	7,0658
0,26	128,73	0,0010684	0,692	541,2	2718,9	2177,7	1,6213	7,0399
0,28	131,20	0,0010709	0,646	551,7	2722,3	2170,7	1,6471	7,0152
0,30	133,54	0,0010733	0,605	661,7	2725,5	2163,9	1,6716	6,9922
0,35	138,87	0,0010787	0,524	584,4	2732,3	2147,9	1,7276	6,9404
0,40	143,62	0,0010836	0,462	604,6	2738,7	2134,1	1,7766	6,8969
0,45	147,92	0,0010883	0,413	623,0	2743,9	2120,9	1,8204	6,8572
0,50	151,84	0,0010927	0,374	640,1	2748,8	2108,7	1,8605	6,8221
0,6	158,84	0,0011009	0,315	670,6	2756,9	2086,3	1,9311	6,7609
0,7	164,96	0,0011081	0,272	697,2	2763,7	2066,5	1,9923	6,7090
0,8	170,41	0,0011149	0,240	720,9	2769,0	2048,1	2,0461	6,6630
0,9	175,36	0,0011213	0,214	742,7	2777,7	2031,0	2,0945	6,6223
1,0	179,88	0,0011273	0,194	462,4	2777,8	2015,6	2,1383	6,5867

Закінчення додатка 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1,1	184,05	0,0011330	0,177	781,3	2781,2	1999,9	2,1786	6,5223
1,2	187,95	0,0011385	0,163	798,4	2784,6	1986,2	2,2156	6,5224
1,3	191,60	0,0011438	0,151	814,6	2787,4	1972,7	2,2510	6,4954
1,4	195,04	0,0011488	0,140	830,0	2789,7	1959,7	2,2841	6,4699
1,5	198,28	0,0011538	0,131	844,5	2791,8	1947,3	2,3148	6,4458

Фізичні параметри для сухого повітря при тиску 760 мм рт. ст.

$T, ^\circ\text{K}$	$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$	$\lambda, 10^{-2}, \frac{\text{Вт}}{\text{кг}\cdot\text{K}}$	$\alpha, 10^{-5}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	$\mu, 10^{-6}, \frac{\text{н}\cdot\text{с}}{\text{м}^2}$	$\nu, 10^{-6}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$	Pr
253	-20	1,395	1,009	2,28	1,620	16,19	12,79	0,716
263	-10	1,342	1,009	2,36	1,745	16,68	12,43	0,712
273	0	1,293	1,005	2,44	1,881	17,17	13,28	0,707
283	10	1,247	1,005	2,51	2,006	17,66	14,16	0,705
293	20	1,205	1,005	2,59	2,142	18,15	15,06	0,703
303	30	1,165	1,005	2,67	2,286	18,64	16,00	0,701
313	40	1,128	1,005	2,76	2,431	19,13	16,96	0,699
323	50	1,093	1,005	2,83	2,572	19,62	17,95	0,698
333	60	1,060	-1,005	2,90	2,720	20,11	18,97	0,696
343	70	1,029	1,009	2,97	2,856	20,60	20,02	0,694
353	80	1,000	1,009	3,05	2,020	21,09	21,09	0,692
363	90	0,972	1,009	3,13	2,189	21,48	22,10	0,690
373	100	0,946	1,009	3,21	3,364	21,88	23,13	0,688

Фізичні параметри води на лінії насичення

$T, ^\circ K$	$t, ^\circ C$	$C_p, \frac{kJ}{kg \cdot K}$	$\lambda \cdot 10^2, \frac{W}{kg \cdot K}$	$\alpha, 10^{-7}, \frac{m^2}{s}$	$\mu, 10^{-6}, \frac{N \cdot s}{m^2}$	$\nu \cdot 10^6, \frac{m^2}{s}$	$\beta \cdot 10^4, \frac{1}{s}$	Pr
273	0	4,212	55,1	1,308	1788,4	1,789	0,63	13,67
283	10	4,131	57,4	1,372	1305,7	1,306	+0,7	9,52
293	20	4,183	59,9	1,433	1004,5	1,006	1,82	7,02
303	30	4,174	61,8	1,486	801,5	0,805	3,21	5,42
313	40	4,474	63,4	1,531	653,3	0,659	3,87	4,31
323	50	4,474	64,8	1,570	549,4	0,556	4,49	3,54
333	60	4,179	65,9	1,606	469,9	0,478	5,11	2,98
343	70	4,187	66,8	1,631	406,1	0,415	5,70	2,55
353	80	4,195	67,5	1,656	355,1	0,365	6,32	2,21
363	90	4,208	68,0	1,675	314,1	0,326	6,95	1,95
373	100	4,220	68,3	1,689	282,5	0,295	7,52	1,75
383	110	4,233	68,5	1,703	259,0	0,272	8,08	1,60
393	120	4,250	68,6	1,711	236,4	0,252	8,64	1,47
403	130	4,267	69,8	1,720	217,8	0,233	9,19	1,36
413	140	4,288	68,5	1,725	201,1	0,217	9,72	1,26
423	150	4,313	68,4	1,728	186,4	0,203	10,30	1,17

Теплофізичні характеристики різних матеріалів

№ з/п	Матеріал	ρ , кг/м ³	t , °С	λ , Вт/м К	C , КДж/кг К
1.	Азбестовий картон	900	30	$0,166 \cdot 10^{-3}t$	0,816
2.	Бетон	2300	20	1,28	1,13
3.	Дуб поперек волокон	730	20—80	0,24—0,31	2,5—2,7
4.	Береза поперек волокон	650	20—80	0,21—0,28	2,5—2,7
5.	Сосна поперек волокон	520	20—80	0,18—0,23	2,5—2,7
6.	Картон	160—500	20	0,14—0,35	1,51
7.	Цеглашамотна	1850	0	0,835	0,88
8.	Цегла силікатна	1900	0	0,81	0,84
9.	Плити деревно-волокнисті	150	—	0,06	2,5
10.	Поліетилен	930	25—30	0,276—0,285	2,21—2,93
11.	Фанера	600	0	0,15	2,51
12.	Червона цегла	1800	0	0,77	0,88
13.	Шлакобетон	1500	0	0,7	0,8
14.	Деревне вугілля	190	80	0,074	—
15.	Кам'яне вугілля	1400	20	0,19	1,3
16.	Фарфор	2440	95	1,03	1,09
17.	Органічне скло	1800	20	0,185	1,69
18.	Скляне звичайне	2500	0	0,74	0,67
19.	Деревна кора	350	20	0,076	—
20.	Текстоліт	1300—1400	20	0,23—0,34	1,46—1,51
21.	Цинк	7000	20	116,3	0,394
22.	Нікель	9000	20	58,2	0,381
23.	Алюміній	2670	0—200	209	0,92

Закінчення додатка 6

24.	Бронза	7400—8900	20	64	1,13
25.	Залізо	7850	100	87	1,34
26.	Латунь	8600	0	85,5	0,376
27.	Мідь	8800—8950	0	384	0,381
28.	Срібло	10500	0	458	0,234
29.	Сталь вуглецева 30	7600	300	44	0,45
30.	Чавун сірий	7220	20	63	0,502

Значения комплексов A_n і B_n для води залежно від температури насичення

$T_n, ^\circ\text{C}$	$A_n, 1/\text{м}\cdot\text{К}$	$B_n \cdot 10^3 \text{ м/Вт}$
100	51,5	6,28
110	60,7	6,95
120	70,3	7,65
130	82,0	8,47
140	94,0	9,29
150	107,0	10,15
160	122,0	11,09
170	130,0	12,04
180	150,0	12,90
190	167,0	14,02
200	182,0	15,05
210	197,0	16,08
220	218,0	17,63

Теплотехнічні характеристики палива (на горючумасу)

Паливо	Елементарний склад горючоїмаси, в%					V ^r
	C ^r	H ^r	N ^r	O ^r	S ^r	%
Деревинний порошок	51,5	6,7	0,7	41,0	0,1	82
Донецькевугілля марки:						
Д	75,5	5,5	1,6	13,1	4,3	44
Г	81,0	5,4	1,5	8,7	4,4	40
ПА	91,1	3,5	1,3	1,5	2,7	4
Волинськевугілля, Г	79,5	5,2	1,3	10,3	3,7	39
Міжреченськевугілля, Ж	83,0	5,7	1,1	6,0	4,2	38
Коломийськевугілля, Б	69,5	5,6	1,2	19,8	3,9	51,5
Олександрівськевугілля, Б	67,5	5,8	0,9	19,9	5,9	
Відходидеревини	51,0	4,9	1,0	43,1	—	58,5
Кора сосни	59,21	8,31	5,42	27,06	—	76
Кора твердолистих порід	66,4	4,9	1,0	27,7	—	75
Стружка і тирса	52	4,9	1,0	42,1	—	79
Торф кусковий	50,9	6,0	1,0	42,1	—	76
Тирса гнукотлеених виробів	62	4,8	2,5	34,7	0,3	79
Мазут 200 малосірнистий	86,1	10,6	0,8	32,4	2,8	—
Кора берези	70,59	9,8	5,94	13,66		81
Деревинний порошок	46,054	6,82	4,081	42,97	0,095	78
Солома	44,9	5,4	1,7	48,0	—	—

Теплотехнічні характеристики палива (на робочу масу)

Паливо	Елементарний склад робочої маси, в %							
	C ^p	H ^p	S _{ор+к}	O ^p	N ^p	A ^p	W ^p	V ^r
Донецькевугілля, Д	49,3	3,6	3,0	8,3	1,0	21,8	13	43
Донецькевугілля, Т	62,7	3,1	2,8	1,7	0,9	23,8	5	12
Донецькевугілля, А	63,8	1,2	1,7	1,3	0,6	22,9	8,5	3,5
Відходидеревини	32,8	3,96	0	27,2	0,39	0,65	35	80
Відходи деревини	25,2	3,02	0	20,9	0,297	0,5	50	80
Волинськевугілля, Г	58,83	3,85	2,2	7,6	1,0	16	10,0	39
Мазут малосірний	86,1	10,6	2,8	0,57	0	0,11	0	—
Солома	42,7	5,3	0,1	36,9	0,5	4,5	10	80
Торф кусковий	24,7	2,6	0,1	15,2	1,1	6,3	50	70
Тирса з гнутоклеєних виробів	39,2	4,8	0,7	30,3	0,5	1,5	23	79
Верба	37,09	5,372	0	32,925	2,468	2,144	20	74

Характеристика природнихгазоподібних палив

Газ	Об'ємний склад газів, %								
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	CO ₂	N ₂	H ₂ S	ρ, кг/м ³
Дашавський	98,3	0,22	0,13	0,06	0,03	0,20	1,1	—	0,565
Угерський	97,5	0,19	0,09	0,08	0,09	0,20	1,3	—	0,567
Сагайдакський	92,0	0,03	0,03	0,01	—	0,70	6,0	—	0,592
Шебелинський	93,0	4,50	0,90	0,70	—	0,15	1,0	—	0,592

Характеристика штучнихгазоподібних палив

Газ	Об'ємний склад газів, %								
	H ₂	CH ₄	C _n H _m	H ₂ S	CO ₂	O ₂	N ₂	CO	ρ, кг/м ³
Генераторний газ: з деревини	14	3,0	0,4	—	6,5	0,2	46,9	29	1,122
відгазифікації торфу в киплячому шарі	10,9	1,9	0,7	—	9,8	0,2	56,2	20,3	1,188

від переробки нафти	14	41	43	—	0,5	—	0,2	1,3	0,996
від деревовугільних реторт	8	1,6	—	—	12	—	51,4	27	1,238
Біогаз	0,2	72	1,0	0,1	26	0,4	0,3	0	—

Ентальпія 1 м³ газів і повітря

t, °C	(C·t) _{RO₂}	(C·t) _{N₂}	(C·t) _{H₂O}	(C·t) _{пов.}
100	169	130	151	132
200	357	260	304	266
300	559	392	463	403
400	772	527	626	542
500	996	664	794	684
600	1222	804	967	830
700	1461	946	1147	979
800	1704	1093	1335	ИЗО
900	1951	1243	1524	1281
1000	2202	1394	1725	1436
1200	2717	1695	2131	1754
1400	3240	2009	2558	2076
1600	3767	2323	3001	2403
1800	4303	2642	3458	2729
2000	4843	2964	3926	3064

Паливоіпалильні для йогоспалювання

Паливо	Паропроодуктивність, Т/год.	
	2,6; 4,0; 6,5;	10; 20; 25; 30;
Антрацит (АС I AM)	Палильня з закидувачем на нерухомий шар	Палильня з ланцюговою решіткою прямого ходу
Кам'яне вугілля (марки Д, Г, СС)	Палильня а закидувачем на нерухомий шар	Палильня з ланцюговою решіткою зворотнього ходу і закидувачем
Буре вугілля Б1; Б2, сланці	Палильня з закидувачем на нерухомий шар	Палильня з ланцюговою решіткою зворотнього ходу і закидувачем
Всходидеревини з $W^p \leq 40\%$	Палильня швидкісного горіння ЦКТИ — Померанцева; шахтна палильня з нахиленою решіткою	Палильня швидкісного горіння ЦКТИ — Померанцева
Відходидеревини з $W > 40\%$	Вихрова палильня системи Шершньова, або шахтна палильня	
Деревинний порошок $W^p \approx 5\%$	Циклонна палильня	Камерна циклонна
Кусковий торф	Шахтна палильня	Шахтно-ланцюгова з решіткою прямого ходу
Кам'яне та буре вугілля	Палильня з пневмомеханічним закидувачем ланцюговою решіткою прямого ходу	
Мазут і газ	Камерна палильня	

Основні розрахункові характеристики палилень

Паливо	Коефіцієнт надлишку повітря, α	Теплова напруга дзеркала горіння, кВт/м ²	Теплова напруга об'єму палильні, кВт/м ³	Втрати тепла	
				Від хімічного неповного згорання, q_3 , %	Від механічного неповного згорання, q_4 , %
Палильня з механічним закидувачем і нерухомою решіткою					
Кам'яне вугілля	1,4	930–1160	230–350	6,0	0,8
Антрацит	1,6	930–1160		11,0	0,8
Палильня з решіткою прямого ходу					
Антрацит	1,3	1400—1750	290—460	8,0	0,5
Палильня з ланцюговою решіткою зворотнього ходу із закидувачем					
Кам'яне і буре вугілля	1,3	1400–1750	280–460	6,0	0,8
Вихрова палильня системи Шершньова					
Відходи деревини, тирса, фрезерний торф	1,25	—	170	2,5	2,0
Палильня швидкісного горіння ЦКТИ					
Здрібнені відходи деревини	1,3	2330–4650	232—348	3,0	1,0
Циклонна палильня					
Деревинний порошок	1,1	—	1500–1800	2,0	1,0
Камерна палильня					
Мазут	1,1–1,15	—	407—465	—	1,0
Газ	1,1—1,15	—	465—582	—	1,0

Втрати тепла котлом у докiлля

Паропродуктивнiсть $D, T/\text{год.}$	Втрати тепла $q_5, \%$	Паропродуктивнiсть $D, T/\text{год.}$	Втрати тепла $q_5, \%$
0,5	4,7	4,0	1,3
0,7	4,5	6,5	4,5
0,8	4,1	19,0	4,1
1,0	3,0	12,0	3,9
2,5			

Залежнiсть мiж рiзними температурними шкалами

№ з/п	Назва шкали	$t, ^\circ\text{C}$	$t, ^\circ\text{Ra}$	$t, ^\circ\text{F}$	$t, ^\circ\text{R}$	T, K
1	Цельсiя, $^\circ\text{C}$	—	$\frac{5}{9}t^\circ \text{Ra} - 273,3$	$\frac{t^\circ\text{F} - 32}{1,8}$	$1,25 \cdot ^\circ\text{K}$	$T - 273$
2.	Ранкiна, $^\circ\text{Ra}$	$1,8(t^\circ\text{C} + 273)$	—	$t^\circ\text{F} + 459,67$	$1,8(1,25 \cdot t^\circ\text{R} + 273,15)$	$\frac{9}{4}T$
3.	Фаренгейта, $^\circ\text{F}$	$1,8 \cdot t^\circ\text{C} + 32$	$t^\circ\text{Ra} - 459,67$	—	$\frac{9}{4}t^\circ\text{R} + 32$	$\frac{9}{5}(T - 255,3)$
4.	Ремюра, $^\circ\text{R}$	$0,8 \cdot t^\circ\text{C}$	$0,8(\frac{5}{9}t^\circ\text{Ra} - 273,15)$	$\frac{9}{4}(t^\circ\text{F} - 32)$	—	$0,8(T - 273)$
5.	Кельвiна, K	$t^\circ\text{C} + 273$	$\frac{5}{9}t^\circ \text{Ra}$	$0,55t^\circ\text{F} + 255,2$	$1,25 \cdot t^\circ\text{R} + 273$	—

Термодинамічні функції повітря

$t, ^\circ\text{C}$	$i, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	π_0	θ_0	$t, ^\circ\text{C}$	$i, \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	π_0	θ_0
-33	240,15	0,6373	10814	-5	268,21	0,9367	8215
-32	241,15	0,6466	10702	-4	269,22	0,9490	8139
-31	242,15	0,6560	10593	-3	270,22	0,9614	8064
-30	243,15	0,6655	10484	-2	271,22	0,9739	7990
-29	244,16	0,6751	10378	-1	272,22	0,9865	7917
-28	245,16	0,6848	10273	0	273,23	0,9992	7845
-27	246,16	0,6946	10169	1	274,23	1,0120	7774
-26	247,16	0,7045	10067	2	275,23	1,0250	7703
-25	248,17	0,7145	9966	3	276,24	1,0381	7634
-24	249,17	0,7246	9866	4	277,24	1,0513	7565
-23	250,17	0,7349	9768	5	278,24	1,0646	7498
-22	251,17	0,7452	9672	6	279,20	1,0780	7431
-21	252,17	0,7556	9576	7	280,25	1,0916	7365
-20	253,18	0,7661	9482	8	281,25	1,1052	7300
-19	254,18	0,7767	9390	9	282,25	1,1190	7235
-18	255,18	0,7874	9298	10	283,26	1,1330	7172
-17	256,18	0,7983	9208	11	284,26	1,1470	7109
-16	257,18	0,8092	9119	12	285,26	1,1612	7047
-16	258,19	0,8203	9031	13	286,27	1,1755	6986
-14	259,19	0,8314	8945	14	287,27	1,1899	6925
-13	260,19	0,8427	8859	15	288,27	1,2045	6865
-12	261,20	0,8540	8775	16	289,28	1,2191	6806
-11	262,20	0,8655	8692	17	290,28	1,2339	6748
-10	263,20	0,8771	8609	18	291,28	1,2489	6690
-9	264,20	0,888	8528	19	292,29	1,2639	6633
-8	265,21	0,9006	8448	20	293,29	1,2791	6577
-7	266,21	0,9125	8369	21	294,29	1,2944	6521
-6	267,21	0,9246	8292	22	295,30	1,3099	6466