

## Лекція 2

### Загальні відомості про технічну термодинаміку

Технічна термодинаміка—теоретичний розділ ТОТ—наука, яка вивчає закони перетворень між теплотою, роботою, внутрішньою енергією, властивості робочих тіл, за допомогою яких відбуваються ці перетворення у теплових машинах, принципи дій, конструктивні особливості усіх теплових машин, двигунів тощо.

Предметом технічної термодинаміки є визначення термічного ККД, який вказує на долю перетворення підведеної теплоти у зовнішню корисну роботу. Метою термодинамічного аналізу роботи теплової машини є визначення термічного ККД, величин, які впливають на його зростання, аналіз з метою підвищення термічного ККД, а отже і підвищення ефективності машини. Подальший крок—внесення змін у конструкції машин.

### Основні поняття і визначення.

Робоче тіло—газ, рідина та їх суміші. Найбільш широко використовуване робоче тіло—водяна пара. У процесі виконання робочим тілом термодинамічного циклу водяна пара змінює фізичні властивості.

Джерело теплоти—тіло, яке віддає або сприймає від іншого теплову енергію.

Верхнє джерело теплоти (теповіддачик)—віддає конструкції машини або іншому тілу теплоту.

Нижнє джерело теплоти (теплоприймач)—сприймає від конструкції машини або іншого тіла теплоту. Для теплових машин таким джерелом є оточуюче середовище.

Термодинамічна система—множина верхнього та нижнього джерел теплоти, конструкції машини і робочого тіла або окремо вибраний об'єкт для термодинамічних досліджень.

Термодинамічний процес—зміна стану або хоча б одного із параметрів робочого тіла. Розрізняють ізобарний ( $P=\text{const}$ ), ізохорний ( $V=\text{const}$ ), ізотермічний ( $T=\text{const}$ ), адіабатний ( $Q=\text{const}$ )—без теплообміну з оточуючим середовищем, політропний ( $C=\text{const}$ ) термодинамічні процеси.

Термодинамічний цикл—замкнений термодинамічний процес. Усі машини працюють за циклами.

Параметри робочого тіла—величини, які характеризують стан робочого тіла. Розрізняють основні параметри робочого тіла, теплові або калоричні параметри, допоміжні параметри робочого тіла.

### **Основні теплотехнічні одиниці вимірювань у системі СІ.**

Різноманіття одиниць та пов'язані з цим незручності породили ідею створення універсальної системи одиниць фізичних величин для всіх галузей науки і техніки, яка могла б замінити всі існуючі системи та окремі позасистемні одиниці. У результаті робіт міжнародних метрологічних організацій така система була розроблена і отримала назву Міжнародної системи одиниць із скороченим позначенням СІ (Система Інтернаціональна). СІ була прийнята XI Генеральною конференцією з мір та ваг (ГКМВ) в 1960 р. як сучасна форма метричної системи.

Універсальність СІ забезпечується тим, що сім основних одиниць, покладених в її основу, є одиницями фізичних величин, які відображають основні властивості матеріального світу і дають можливість утворювати похідні одиниці для будь-яких фізичних величин у всіх галузях науки і техніки. Цій же меті слугують і додаткові одиниці, необхідні для утворення похідних одиниць, що залежать від плоского і тілесного кутів. Перевагою СІ перед іншими системами одиниць є принцип побудови самої системи: СІ побудована для деякої системи фізичних величин, що дозволяють представити фізичні

явища у формі математичних рівнянь; деякі з фізичних величин прийняті основними і через них виражаються всі інші - похідні фізичні величини. Для основних величин встановлені одиниці, розмір яких погоджений на міжнародному рівні, а для решти величин утворюють похідні одиниці. Побудована таким чином система одиниць і вхідні в неї одиниці називаються когерентними, так як при цьому витримано умова, що співвідношення між числовими значеннями величин, вираженими в одиницях СІ, не містять коефіцієнтів, відмінних від тих, які в спочатку вибрані рівняння, що зв'язують величини. Когерентність одиниць СІ при їх застосуванні дозволяє до мінімуму спростити розрахункові формули за рахунок звільнення їх від перевідних коефіцієнтів.

В СІ усунена множинність одиниць для вираження величин одного і того ж роду. Так, наприклад, замість великого числа одиниць тиску, застосовувалися на практиці, одиницею тиску в СІ є тільки одна одиниця - паскаль.

Встановлення для кожної фізичної величини своєї одиниці дозволило розмежувати поняття маси (одиниця СІ - кілограм) і сили (одиниця СІ - ньютон). Поняття маси слід використовувати у всіх випадках, коли мається на увазі властивість тіла або речовини, що характеризує їх інерційність і здатність створювати гравітаційне поле, поняття ваги - у випадках, коли мається на увазі сила, що виникає внаслідок взаємодії з гравітаційним полем. Визначення основних одиниць можливо з високим ступенем точності, що в кінцевому рахунку не тільки дозволяє підвищити точність вимірювань, а й забезпечити їхню єдність. Це досягається шляхом "матеріалізації" одиниць у вигляді еталонів і передачі від їх розмірів робочих засобів вимірювань за допомогою комплексу зразкових засобів вимірювань. Міжнародна система одиниць завдяки своїм перевагам отримала широке поширення у світі. В даний час важко назвати країну, яка б не впровадила СІ, перебувала б на стадії впровадження або не прийняла б рішення про впровадження СІ. Так, країни, раніше застосовували англійську систему заходів (Англія, Австралія, Канада, США та ін) також взяли СІ.

До основних теплотехнічних одиниць вимірювань у системі СІ належать:

- одиниця довжини [м];
- маси [кг];
- часу [с];
- температури [К, °С];
- теплової енергії роботи [Дж];
- тиску [Па];
- тепловий потік; потужність [Вт=Дж /с];
- густина теплового потоку [Вт/м<sup>2</sup>];
- кількість речовини [кмоль].

### **Параметри стану робочого тіла**

Величини, які характеризують фізичний стан тіла називаються термодинамічними параметрами стану. Такими параметрами є питома об'єм, абсолютний тиск, абсолютна температура, внутрішня енергія, ентальпія, ентропія, концентрація, теплоємність і т.д. При відсутності зовнішніх силових полів (гравітаційного, електромагнітного та ін.) Термодинамічний стан однофазного тіла можна однозначно визначити 3-ма основними параметрами стану - питомим об'ємом ( $v$ ), температурою ( $T$ ), тиском ( $P$ ).

Всі параметри стану будь-якої термодинамічної системи поділяються на інтенсивні та екстенсивні. Інтенсивними називають параметри, що не залежать від кількості речовини (наприклад тиск, температура), а екстенсивними – ті, що залежать від кількості речовини (наприклад об'єм). Всі екстенсивні параметри мають властивості адитивності. Адитивність ( від лат. *additivus* – додатковий) – властивість величин, яка полягає у тому, що значення величини, відповідне цілому об'єкту, дорівнює сумі величин, відповідних його частинам за будь-якого розбиття об'єкту на частини. Наприклад, адитивність об'єму означає, що об'єм цілого тіла дорівнює сумі об'ємів складових його частин. Параметри, що відображають внутрішню теплову енергію, називають калоричними.

Термічні параметри стану – тиск, температура, питома об'єм.

Тиск із погляду молекулярно-кінетичної теорії є середній результат ударів молекул газу, що знаходяться в безупинному хаотичному русі, по стінках судини, у якій утримується газ. Тиск вимірюється силою, яка рівномірно діє на одиницю поверхні, і являє собою відношення нормальної складової сили до поверхні, на котру сила діє

$$P = N / F \quad (2.1)$$

де  $N$  – сила, Н;

$F$  – площа поверхні,  $m^2$ .

У Міжнародній системі одиниць СІ тиск вимірюється у паскалях:

1 Па = 1 Н/м<sup>2</sup>. Оскільки тиск в 1 паскаль є величина малою (1 ат = 98066,5 Па), зручніше використовувати більш великі значення тиску:

1 кПа = 10<sup>3</sup>Па; 1 МПа = 10<sup>6</sup>Па; 1 ГПа = 10<sup>9</sup>Па.

На практиці часто використовують позасистемні одиниці:

1 кгс/м<sup>2</sup> = 1 мм.вод.ст. = 9,8066 Па  $\approx$  10 Па; 1 мм.рт.ст. = 133,3 Па; 1 атм = 760 мм.рт.ст. = 101325 Па; 1 бар = 10<sup>5</sup>Па;

Розрізняють тиск: атмосферний, надлишковий, розрядження (вакуум). Атмосферний тиск  $P_{атм}$  – це тиск навколишнього середовища, якій вимірюють барометрами. Надлишковий тиск  $P_{над}$  – різниця між тиском навколишнього середовища і тиском рідини чи газу за умовою, що він перевищує атмосферний тиск. Вимірюють надлишковий тиск манометрами. Вакуум (розрядження)  $P_{вак}$  – різниця між тиском навколишнього середовища і тиском рідини чи газу у даному об'ємі за умовою, що він менше атмосферного тиску. Вимірюють розрядження вакуумметрами.

Тиск газу можна також вимірювати за допомогою висоти стовпчика рідини, яка стикається з даним газом, тобто за допомогою U-подібного манометра. Середовище з тиском газу  $P_a$  з'єднується за допомогою металевої чи гумової трубки з одним коліном U-подібного манометра. Друге коліно манометра з'єднується з атмосферою, що має барометричний тиск  $P_b$  (рис. 2.1 ).

У залежності від того, в якому коліні манометра ми маємо більш високий стовпчик рідини, ми отримуємо надлишковий тиск чи розрядження. Різниця висот рідини  $h$  в обох колінах дорівнює тиску середовища. У випадку надлишкового тиску висота рідини з боку атмосфери буде більше (рис 2.1 ). При цьому

$$P_{над} = h\rho g \quad (2.2)$$

де  $\rho$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

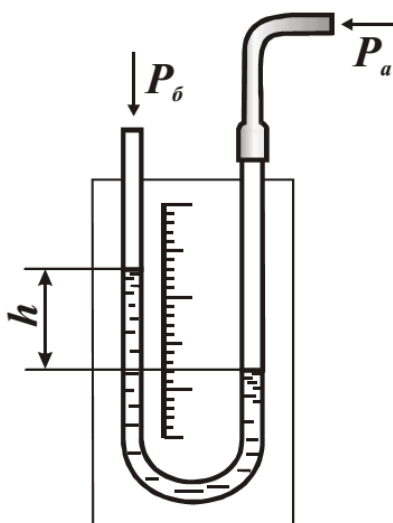


Рис. 2.1 – Вимірювання тиску U-подібним манометром

Як робочу рідину найчастіше використовують воду чи спирт. З рівняння (2.2) можна побачити, що при використанні води, для якої густина дорівнює 1000 кг/м<sup>3</sup>, висота стовпчика води  $h$  U-подібного манометра в міліметрах дорівнює тиску  $P_{над}$  в міліметрах водного стовпа. Якщо це значення помножити на  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ , то ми отримаємо значення тиску  $P_{над}$  в паскалях.

Точність виміру тиску U-подібним манометром при правильному відліку рівнів рідини в трубках є досить високою. У зв'язку з тим, що рідина при підвищенні температури розширюється, висота стовпчика рідини, відповідна даному тиску, теж збільшується. Це слід враховувати при переводі в паскалі показань ртутних барометрів. Звичайно показання барометрів зводять до 0 °С за формулою:

$$P_{0^{\circ}\text{C}} = P_{t^{\circ}\text{C}}(1 - \beta t) \quad (2.3)$$

де  $P_{0^{\circ}\text{C}}$  – барометричний тиск при  $0^{\circ}\text{C}$ , мм.рт.ст;

$P_{t^{\circ}\text{C}}$  – барометричний тиск при температурі  $t^{\circ}\text{C}$ , мм.рт.ст;

$\beta$  – температурний коефіцієнт об'ємного розширення рідини (для ртуті  $\beta = 0,000172$ ).

Термодинамічним параметром стану робочого тіла є тільки абсолютний тиск  $P_{\text{абс}}$ , тобто тиск, якій вимірюється від абсолютного нуля тиску. Це пов'язано з тим, що атмосферний тиск постійно змінюється, отже, змінюється величина вакууму чи надлишкового тиску. При визначенні абсолютного тиску у будь-якої судині розрізняють два випадки:

- □ тиск у судині більше атмосферного:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} + P_{\text{над}} \quad (1.4)$$

- □ тиск у судині менше атмосферного:

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{атм}} - P_{\text{вак}} \quad (1.5)$$

Дуже наочно можна подати випадки виміру тиску, якщо відкладати значення абсолютного тиску у виді відрізків від лінії, прийнятої за нуль тиску (рис. 2.2).

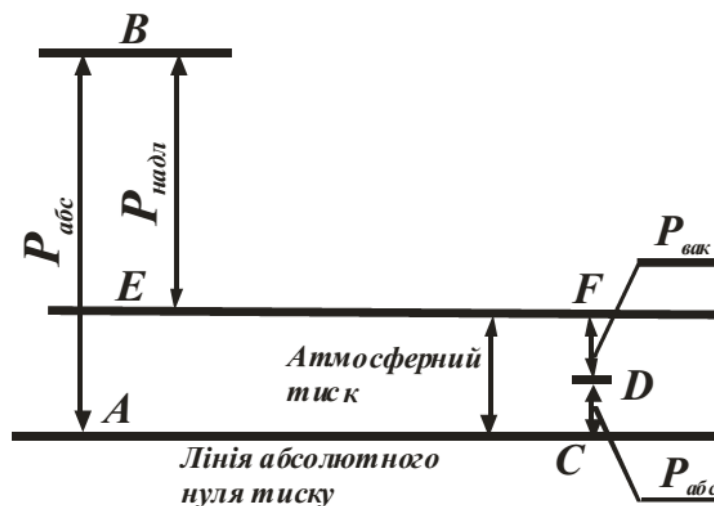


Рис. 2.2 – Графічне зображення абсолютного тиску та його складових

Відрізки АВ і CD відповідають тиску в судині, який виміряли від нуля тисків, тобто абсолютному тиску: перший – для випадку надлишкового тиску, другий – для випадку вакууму. Відрізок EB відповідає перевищенню тиску газу над тиском атмосфери – це надлишковий тиск; відрізок FD відповідає вакууму, тобто розрідженню.

**Температура** з якісної сторони характеризує ступінь нагріву тіла, з кількісної сторони температура є мірою інтенсивності теплового руху молекул. У термодинаміці найчастіше використовують абсолютну температуру. У системі СІ одиницею виміру абсолютної температури  $T$  є кельвін (К). Абсолютна температура завжди позитивна. При температурі абсолютного нуля припиняється тепловий рух молекул. Це гранична мінімальна температура і є початком для відліку абсолютних температур.

Розширення тіл від нагрівання (рідинні термометри), зміна об'єму при постійному тиску чи зміна тиску при постійному об'ємі (у газових термометрах), зміна електричного опору провідника при нагріванні (термометри опору), зміна електрорушійної сили в ланцюзі термопар при зміні температури спаю, закони випромінювання твердих тіл (в оптичних пірометрах).

У термодинаміці крім шкали Кельвіна використовується також шкала Цельсія, у якій точкою відліку є потрійна точка води (точка, де рідка, пароподібна і тверда фази води знаходяться в рівновазі). Між температурою в кельвінах ( $T$ ) і температурою у градусах Цельсія ( $t$ ) – існує наступне співвідношення:

$$T = t + 273,15 \quad (2.6)$$

Градус абсолютної шкали Кельвіна чисельно дорівнює градусу шкали Цельсія.

**Питомий об'єм** ( $v$ ) – це об'єм одиниці маси речовини,  $\text{м}^3/\text{кг}$ , або величина, зворотна густині речовини:

$$v = V / m = 1 / \rho \quad (2.7)$$



де  $V$  – повний об'єм речовини,  $\text{м}^3$ ;

$m$  – маса речовини,  $\text{кг}$ ;

$\rho$  – густина речовини,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Для порівняння питомих об'ємів різних газів їх приводять до однакових, так званих нормальних умов, а саме, до тиску, який дорівнює одній фізичній атмосфері (760 мм.рт.ст) при температурі  $0^\circ\text{C}$ .

Теплоємність—теплофізичний параметер стану робочого тіла, якій вказує на те, яку Кількість теплоти в Джоулях необхідно підвести до тіла, щоб його температура зросла на  $1\text{К}$ .  $\text{С}[\text{Дж}/\text{К}]$

Залежно від одиниці вимірювань робочого тіла розрізняють наступні теплоємності:

масову (питому)  $c = \frac{C}{m}$   $[\text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{кг})]$ ;

об'ємну  $c' = \frac{C}{V}$   $[\text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{м}^3)]$ ;

мольну  $c_\mu = \frac{C}{n}$   $[\text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{кмоль})]$ .

Залежно від термодинамічного процесу розрізняють ізобарну теплоємність (коли робоче тіло змінює свої параметри при сталому тиску)  $C_p$   $[\text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{кг})]$ , а також ізохорну теплоємність (зміна параметрів при сталому об'ємі)  $C_v$   $[\text{Дж}/(\text{К}\cdot\text{кг})]$ .

Для одного і того тіла при однакових параметрах стану  $C_p > C_v$ .

$C_p$  і  $C_v$  зв'язані між собою наступними двома рівняннями:

1) рівняння Майера

$$C_p - C_v \geq R \quad (2.8)$$

де  $R$ —газова стала, конкретного газу  $[\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})]$ , береться з таблиць або підраховується для даного газу за наступною формулою (наприклад, для  $\text{O}_2$ ,  $n = 32$ ,  $R_{\text{O}_2} = 8314 : 32 = 259,8125$   $[\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})]$ . Знак „=”—для ідеальних газів, знак „>” —для реальних;

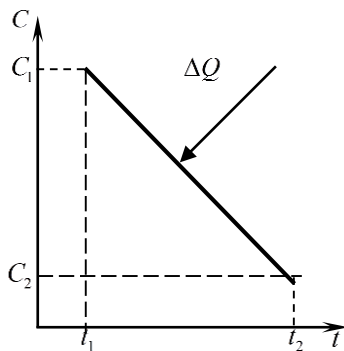
2) рівняння показника адіабати

$$k = \frac{C_p}{C_v} > 1 \quad (2.9)$$

$k$  —показник адіабати (для одноатомних  $k=1,67$ ; двохатомних— $k=1,4$ ; трьох- і багатоатомних  $k=1,33$ ).

Теплоємність для кожного тіла залежить від температури. Залежність є поліноміальною загального вигляду, а для теплотехнічних розрахунків обмежується температурою в третій степені.

Розрізняють середню теплоємність даного тіла в термодинамічному процесі.



$$\bar{C} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{t_2 - t_1};$$

Рис. 2.3. Визначення середньої теплоємності