

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія технічного обслуговування авіаційної техніки**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

з навчальної дисципліни  
«Термодинаміка та теплопередача»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми  
першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

**272 Авіаційний транспорт**  
**(Аеронавігація)**

**Тема 2. Перший закон термодинаміки. Термодинамічні процеси в газах.**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 р. № 7

**СХВАЛЕНО**

Методично радою Кременчуцького  
льотного коледжу  
Протокол від 28.08.2023 р. № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 р. № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки, протокол від 28.08.2023 р. № 1

**Розробники:** викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки *Яніцький А.А.*

**Рецензенти:**

1. Завідувач кафедри технологій аеропортів Національного авіаційного університету, д.т.н., професор *Тамаргазін О.А.*

Викладач циклової комісії технічного обслуговування авіаційної техніки Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, к.т.н., с.н.с. *Тягній В.Г.*

## **План лекції**

1. Внутрішня енергія системи;
2. Перший закон термодинаміки;
3. Робота і теплота;
4. Ентальпія;
5. Завдання і методи дослідження термодинамічних процесів;
6. Ізотермічний процес;
7. Ізобарний процес;
8. Ізохорний процес;
9. Адіабатний процес;
10. Політропні процеси. Аналіз політропних процесів.

### **1. Рекомендована література (основна, допоміжна), інформаційні ресурси в Інтернеті**

#### **Основна:**

1. Котовський В. Н. Технічна термодинаміка : тексти лекцій, 2015. 88 с.
2. Котовський В. Н. Теплопередача : тексти лекцій, 2015. 76 с.

#### **Допоміжна:**

3. Базаров І. П. Термодинаміка : підручник. 2010. 384 с.
4. Баранов В. М., Коньков А. Ю. Термодинаміка і теплопередача: навчальний посібник; 2-е видання, перероблене. 2004. 91 с.
5. Технічна термодинаміка і теплопередача : підручник для академічного бакалаврату В. А. Кудінов, Е. М. Карташов, Є. В. Стефанюк , 2016. 442 с.

#### **Інформаційні ресурси в інтернеті:**

6. URL : <http://klk.univd.edu.ua/uk/dir/177/biblioteka>
7. URL : <http://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/6/29/6-29-kl76.pdf>

### 3 Перший закон термодинаміки

#### 2.1 Внутрішня енергія термодинамічної системи

Раніше йшлося про те, що кожна термодинамічна система володіє деякою внутрішньою енергією  $U$ . Вона складається їх суми енергій: кінетичної  $E_{\text{кін}}$  (Енергія хаотичного теплового руху частинок) і потенційної  $E_{\text{пот}}$  (Енергія міжмолекулярних взаємодій частинок).

Внутрішня енергія не пов'язана з рухом системи як цілого і дією зовнішнього силового поля і складається з енергій окремих частин, що складають систему.

$$U = E_{\text{кін}} + E_{\text{пот}}$$

де  $E_{\text{пот}} = E_{\text{МВ}} + E_{\text{хім}} + E_{\text{яд}}$ . Тут  $E_{\text{хім}}$  - енергія хімічних зв'язків, яка проявляється при проходженні хімічних реакцій,  $E_{\text{яд}}$  - внутрішньоядерна енергія, яка проявляється при ядерних реакціях. Складові  $E_{\text{хім}}$  і  $E_{\text{яд}}$  в термодинаміки розглядати не будемо.

Якщо система, як ціле, що не рухається, а зовнішнє силове поле відсутнє те повна енергія системи дорівнює внутрішньої енергії:

$$E = U$$

#### Зміна внутрішньої енергії при зміні стану системи.

При різних термодинамічних процесах система обмінюється з зовнішнім середовищем теплом і роботою. В результаті цього її внутрішня енергія змінюється.

У всіх формулах, що виражають перший закон термодинаміки, позитивними вважаються теплота, підведена до системи (отримана системою) і робота, вироблена самою системою, тобто відведена (віддана) від системи.

Якщо система отримує теплоту  $+Q$ , то ми повинні отримати від системи відповідно роботу  $-L$ .

При цьому внутрішня енергія системи зміниться  $\Delta U$ .

$$\Delta U = Q - L$$

Відповідно до першого закону термодинаміки (2.4) при нескінченно малому процесі зміна внутрішньої енергії дорівнюватиме:

$$dU = dQ - AdL \quad (2.7)$$

Якщо стан системи змінюється кінцевим чином від 1 до 2, то різниця внутрішніх енергій в цих точках виразиться, як  $\int_1^2 dU$ . А величина її буде:

$$\int_1^2 dU = \int_1^2 dQ - \int_1^2 AdL \quad \text{або:}$$
$$\int_1^2 dU = Q_{1-2} - AL_{1-2} \quad (2.8)$$

Як вже було сказано раніше, в круговому процесі внутрішня енергія системи не змінюється, отже:

$$\bullet \quad dU = 0 \quad (2.9)$$

З цього випливає, що приріст внутрішньої енергії  $dU$  є повний диференціал, а  $U$  є функція стану системи.

При переході зі стану 1 в стан 2  $U$  змінюється на величину:

$$\int_1^2 dU = U_2 - U_1$$

де:  $U_1$  і  $U_2$  - внутрішня енергія в станах 1 і 2.

Тоді відповідно до (2.7):

$$Q_{1-2} - A L_{1-2} = U_2 - U_1 \quad (2.10)$$

Це означає, що частина тепла підведене до системи витрачається на здійснення роботи, а інша частина йде на зміну внутрішньої енергії системи.

У Ізохоричний процесі  $V = \text{const}$ . Тому робота розширення дорівнює нулю, тоді все підведене до системи тепло йде на підвищення внутрішньої енергії системи.

$$Q_V = U_2 - U_1$$

### Властивості внутрішньої енергії

Внутрішня енергія, як функція стану термодинамічної системи, має такі властивості:

1. Внутрішня енергія є однозначною функцією стану термодинамічної системи.
2. Внутрішня енергія є адитивною величиною - внутрішня енергія складної системи дорівнює сумі внутрішніх енергій її частин.

$$U = U_1 + U_2 + U_3 + \dots$$

3. При будь-якому нескінченно малому процесі зміни стану системи зміна внутрішньої енергії системи дорівнює:

$$dU = dQ - AdL$$

де:  $dQ$  - елементарне кількість тепла, підведене до термодинамічної системи;  
 $dL$  - елементарна робота, здійснена системою.

4. Внутрішня енергія визначається з точністю до деякої постійної величини:

$$U = \int_1^2 (dQ - AdL) + U_1$$

### Внутрішня енергія ідеального газу.

Для ідеального газу вираз для внутрішньої енергії виглядає простіше. В ідеальному газі немає міжмолекулярних взаємодій, тому потенційна енергія відсутня. Якщо взяти газ при невисоких температурах, то енергією коливання можна знехтувати. тоді:

$$U_{\text{кин}} = U_{\text{кин.пост}} + U_{\text{кин.вр}} = A \cdot \frac{3 + \sigma_{\text{вр.}}}{2} \cdot k \cdot T \cdot N,$$

а внутрішня енергія буде дорівнює:

$$U = A \cdot \frac{3 + \sigma_{\text{вр.}}}{2} \cdot k \cdot T \cdot N + u_{\circ} \cdot N$$

Так як:  $N = \frac{G}{\mu} \cdot N_A \cdot 10^3$  и  $k \cdot N_A \cdot 10^3 = \mu \cdot R,$

то:

$$U = \left( \frac{3 + \sigma_{\text{вр.}}}{2} A \cdot \mu \cdot R \cdot T + U_{\bullet, \mu} \right) = \left( \frac{3 + \sigma_{\text{вр.}}}{2} \cdot A \cdot R \cdot T + U_{\circ} \right) \cdot G$$

тобто  $U = f(T)$

З рівняння видно, що внутрішня енергія ідеального газу залежить тільки від

температури газу, але не від обсягу і тиску.

## 2.2 Перший закон термодинаміки

В основі першого закону термодинаміки безпосередньо лежить закон збереження і перетворення енергії, який можна застосувати до всіх явищ природи.

**Енергія - це форма руху матерії.** У природі видів енергій багато. Наприклад: кінетична енергія, пов'язана з рухом тіла; електрична енергія, пов'язана з рухом електричних зарядів; внутрішня енергія, пов'язана з молекулярною рухом і т. д ..

Енергія однозначно визначається станом тіла. Вона може в результаті взаємодії тел перетворюватися з одного виду в інший.

В ізолюваній системі сума всіх видів енергій є величина постійна чи інакше:

***Енергія ізолюваної системи при будь-яких, що відбуваються в ній процеси, не змінюється, тобто енергія не знищується і не створюється.***

Дане твердження і є закон збереження і перетворення енергії або перший закон термодинаміки.

Відповідно до першого закону термодинаміки енергія при переході з одного виду в інший не змінюється. Зокрема, за допомогою експериментів визначено, що існує механічний еквівалент переходу механічної енергії в інші види енергій. Наприклад, якщо енергія передається тілу у вигляді тепла, то механічна робота, вироблена тілом за рахунок перетворення енергій дорівнює:

$$L = \frac{1}{A} \cdot Q \quad (2.1)$$

де:  $\frac{1}{A} = 426,45$  кГМ / ккал - механічний еквівалент одиниці теплоти;

$A$  - теплової еквівалент.  $A = 0,002345$  ккал / кГМ

позначимо через  $E$  повну енергію ізолюваною термодинамічної системи. Тоді відповідно до першого закону термодинаміки ця енергія не змінюється з часом:

$$E = \text{const} \quad (2.2)$$

або різниця енергій кінцевого і початкового станів системи дорівнює:

$$E_2 - E_1 = 0$$

Перший закон термодинаміки є результат узагальнення численних спостережень і експериментів, який стверджує, що **теплота, повідомлена системі в будь-якому процесі, йде на підвищення її внутрішньої енергії і на здійснення системою роботи проти зовнішніх сил.**

$$Q = \Delta U + L$$

Розглянемо тепер **адіабатну** систему. У порівнянні з замкнутою системою вона може обмінюватися з зовнішнім середовищем механічної енергією. В цьому випадку при переході системи з одного в інший стан, вона буде здійснювати роботу, яка дорівнює убутку повної енергії системи  $E_1 - E_2$  або:

$$E_2 - E_1 = -AL \quad (2.3)$$

$$\Delta U = -L$$

Вічний двигун першого роду.

Звідси випливає визначення вічного двигуна першого роду:  
це двигун, який може виробляти позитивну роботу без будь-яких змін зовнішнього середовища.

Якщо термодинамічна система повністю не замкнута, то вона може взаємодіяти із зовнішнім середовищем як механічною, так тепловою енергією та зміна повної енергії системи дорівнюватиме:

$$E_2 - E_1 = Q - AL \quad (2.4)$$

$$Q = \Delta U + L$$

Доведемо це. Термодинамічна система знаходиться в навколишньому зовнішньому середовищі і являє собою складну систему. Образно уявімо, що найпростіша термодинамічна система, що складається з циліндра, поршня і газу, знаходиться в кімнаті. Причому, ця складна система є адіабатною. Позначимо повну енергію складної системи через  $E$  а повну енергію зовнішнього середовища -  $E'$ . тоді:

$$E_2 - E_1 = -AL \quad (2.3)$$

,  
або:

$$(E_2 + E_2') - (E_1 + E_1') = -AL$$

Наведене вище рівняння можна переписати у вигляді:  
 $E_2 - E_1 = E_1' - E_2' - AL$

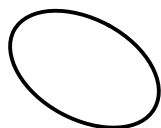
Тут зовнішня робота  $L$  відбувається самої термодинамічної системою, а не зовнішнім середовищем. Тоді спад повної енергії складної системи  $(E_1 - E_2)$  являє собою енергію взаємодії системи з зовнішнім середовищем, відмінну від механічної, тобто роботи. Ця енергія може бути тільки тепловою, і ніякий інший. Тому:

$$E_1 - E_2 = Q$$

Замінивши в попередньому рівнянні різниця енергій через  $Q$ , отримаємо рівняння (2.4), яке представляє собою аналітичний вираз першого закону термодинаміки.

### 2.3 Робота и теплота

Розглянемо круговий процес зміни стану термодинамічної системи.



Він складається в переході система зі стану 1 в 2 і поверненню системи зі стану 2 в 1. Кожен з цих процесів переходу може бути незворотнім.

Так як система повертається в початковий стан, то повна енергія системи не змінюється. Тобто:  $E_2 - E_1 = 0$ , Тоді відповідно до рівняння (2.4):

$$Q - AL = 0 \quad (2.5)$$

або  $Q = \Delta L$ . Це означає, що при будь-якому круговому процесі зміни стану системи повна енергія не змінюється, а робота, здійснена системою, проводиться за рахунок тепла, підведеного із зовнішнього середовища.

Вічний двигун другого роду:

*це двигун, який може виробляти позитивну роботу без якої-небудь зміни внутрішнього середовища, тобто все підведене тепло витрачатися на роботу без втрат.*

$$Q = L$$

Дійсно, нехай  $Q - \Delta L \neq 0$ , а  $Q - \Delta L < 0$ . Тоді  $Q < \Delta L$ , Тобто роботи проводиться більше, ніж підводиться тепла. Значить частина механічної енергії, за рахунок якої проводиться робота, виникає нізвідки. Це суперечить першому закону термодинаміки. Отже, вічний двигун першого роду не може існувати.

У тому випадку, коли процес незамкнутого, то частина тепла отримане системою йде на підвищення повної енергії системи.

Відповідно до закону збереження енергії тепло, отримане системою одно убутку повної енергії навколишнього середовища.

$$E_1 - E_2 = Q,$$

а так як  $Q = \Delta L$  для кругових процесів, то можна записати:

$$E_1 - E_2 = \Delta L,$$

тобто робота, вироблена системою в круговому процесі, дорівнює убутку енергії зовнішнього середовища. Створюється враження, що енергія термодинамічної системи залишається без змін, а робота здійснюється тільки за рахунок енергії зовнішнього середовища або за рахунок зміни зовнішнього середовища.

Крім цього, якщо змінювати стан термодинамічної системи від деякого вихідного стану 1 до кінцевого стану 2, то відповідно до рівняння (2.5) можна записати:  $Q_{1-2} - \Delta L_{1-2}$ . Різниця між поглинутим системою теплом і досконалої її роботою при переході зі стану 1 в стан 2 не залежить від шляху переходу:

$$Q_{1-2} - \Delta L_{1-2} = \text{const}$$

## ЛЕКЦІЯ 5

Ентальпія

**Ентальпія - термодинамічний потенціал, тобто це та енергія, яка доступна для перетворення в теплоту при певних  $T$  і  $P$ .**

Уявімо, що тіло або термодинамічна система вводиться в зовнішню середу, тиск якої  $P'$ . Тоді ця система витіснить із зовнішнього середовища обсяг, рівний об'єму системи. Для цього необхідно виконати роботу виштовхування:  $P' \cdot V$ , Яка передається зовнішньому середовищі у вигляді потенційної енергії.

**повна енергія** розширеної або складної системи в цьому випадку буде дорівнює сумі внутрішньої енергії системи і потенційної енергії  $P' \cdot V$ :

$$E^* = U + AP'V$$

Зміна тиску зовнішнього середовища від  $P'$  до  $P' + dP'$  приведе до зміни і потенційної енергії а, отже, і повною енергії на величину  $VdP'$ .



Якщо термодинамічна система знаходиться в рівновазі з зовнішнім середовищем, то тиск зовнішнього середовища дорівнює тиску системи:  $P' = P$  і:

$$E^* = U + APV$$

Дану суму енергій позначають через  $I$ :

$$I = U + APV \quad (2.11)$$

де  $A$  - тепловий еквівалент системи.

**Внутрішня енергія системи  $U$  є функцією стану системи, а тиск  $P$  - параметр, який характеризує стан системи. Тому  $I$  є також функцією стану системи, і називають її в термодинаміці ентальпії.**

Для ізобарного процесу зміна ентальпії дорівнює кількості підведених в процесі тепла:

$$Q_p = I_2 - I_1$$

Доведемо це.

Відповідно до першого закону термодинаміки:

$$dQ = dU + APdV$$

Тепер продифференціюємо вираження для ентальпії (2.11):

$$dI = dU + A \cdot (PV)' = dU + A(PdV + VdP)$$

$$\text{Звідки:} \quad dU + APdV = dI - AVdP$$

отже:

$$dQ = dI - AVdP \quad (2.12)$$

**А при  $dP = 0$  або  $P = \text{const}$  :**

$$dQ = dI$$

Проінтегрувавши, отримаємо:

$$\int_1^2 dQ = \int_1^2 dI$$

або:

$$Q_p = I_2 - I_1, \quad (2.13)$$

що і потрібно було довести.

Звідси випливає, що якщо ізобарний процес відбувається теплоізолюваною системою, тобто  $dQ = 0$ , то ентальпія системи буде залишатися величиною постійною:  $dI = 0$  і  $I = \text{const}$ .

### **властивості ентальпії**

Ентальпія, як і внутрішня енергія системи, є функцією стану. Тому їй притаманні ті ж властивості, що і внутрішньої енергії то є:

1. Ентальпія є однозначною функцією стану термодинамічної системи.

2. Ентальпія є адитивною величиною:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots$$

3. Для нескінченно малого процесу зміна ентальпії одно:

$$dI = dQ + AVdP$$

4. Ентальпія визначається з точністю до деякої постійної величини:

$$I = \int (dQ + AVdP) + I_0$$

### Ентальпія ідеального газу

Вираз для ентальпії ідеального газу знаходиться за аналогією з внутрішньою енергією, якщо відомі рівняння стану ідеального газу і вираз для внутрішньої енергії.

$$I = \left( \frac{5 + \sigma_{\text{вп}}}{2} ART + I_0 \right) G$$

### 2.5. Завдання и методи дослідження термодинамічних процесів

Відповідно до першого закону термодинаміки тепло, підведене до термодинамічної системи, йде на підвищення її внутрішньої енергії і на виробництво роботи:

$$dQ = dU + AdL$$

Робота може бути представлена в двох видах:

$$dL = PdV ; \quad dL = -VdP$$

Залежно від того, яка робота виконується, вираз для першого закону буде виглядати:

$$dQ = dU + APdV$$

$$dQ = dI - AVdP$$

Якщо поряд з роботою, пов'язаною зі зміною обсягу, здійснюється робота і без зміни обсягу в зазначені вирази додається додатковий член:

$$dQ = dU + APdV + dL_v \quad (2.14)$$

$$dQ = dI - AVdP + dL_v \quad (2.15)$$

Наведені рівняння є загальними виразами першого закону термодинаміки для оборотних процесів зміни стану системи.

### Аналітичні вирази для теплоємностей тіла

Аналітичні вирази для першого закону термодинаміки можуть бути використані для виведення виразів теплоємностей тіла  $C_p$  і  $C_v$ .

Відповідно до (1.13):

$$C_p = \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_p ; \quad C_v = \left( \frac{\partial Q}{\partial T} \right)_v$$

Розглянемо рівноважний процес нагріву тіла. В якості незалежних параметрів візьмемо обсяг і температуру. Кількість тепла підведене до тіла при нескінченно малому процесі і  $dL = 0$  відповідно до (2.14):

$$dQ = dU + APdV$$

Тобто - теплоємність  $C_v$  дорівнює похідної від внутрішньої енергії по температурі при  $V = \text{const}$  і є функцією від параметрів  $V$  і  $T$ .

При виведенні виразу для теплоємності  $C_p$  скористаємося незалежними параметрами температурою і тиском.

Відповідно до рівняння (2.15) маємо:

$$dQ = dI - AVdP$$

### Теплоємність ідеального газу

В ідеальному газі відсутні сили молекулярної взаємодії та кінцевий розмір молекул, що характеризують такі параметри, як обсяг і тиск. Тому теплоємності  $C_p$  і  $C_v$  є функціями тільки температури, так як внутрішня енергія перестає залежати від обсягу:

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T = 0;$$

а отже:  $\left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial U}{\partial T}\right)_v$

З рівняння стану для ідеального газу в питомих одиницях маємо:

$$P \cdot v = R \cdot T;$$

або можна записати:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{v}{T} = \frac{R}{P} = \text{const}$$

Рівняння першого закону термодинаміки відповідно до (2.14):

$$dq = du + APdv$$

Откуда:  $c_p = c_v + AR$  или

$$c_p - c_v = AR \quad (2.23) \text{ где } A - \text{тепловой эквивалент}$$

Це рівняння називають рівнянням Майєра. Воно показує зв'язок між Питомою теплоємністю, а також, що  $\frac{c_p}{c_v}$  на величину  $AR$ .