

## СУ №5: Молекулна физика и термодинамика (2-ри и 3-ти час)

2-ри час: II. Първи принцип на термодинамиката. Специфичен топлинен капацитет на веществата. Моларни топлинни капацитети при газове – уравнение на Майер. Адиабатен процес. Работа при различните термодинамични процеси

1. Първи принцип на термодинамиката – изразява закона за запазване на енергията при топлинните явления.

Важна величина за всяка термодинамична система е нейната вътрешна енергия. Означава се с  $U(J)$  и включва пълната енергия на всички частици, участващи в системата: сумата от кинетичните енергии на топлинното движение на частиците и потенциалните енергии на взаимодействието между тях. За идеалния газ потенциалната енергия на частиците се пренебрегва и неговата вътрешна енергия е сума от кинетичните енергии на частиците  $U = \sum E_{ki} = E_k$  ( $E_k = 3RT/2$  за 1 mol идеален газ).

Първият принцип на термодинамиката свързва изменението на вътрешната енергия на дадена термодинамична система с причините, които предизвикват това изменение. Два фактора водят до изменение на вътрешната енергия:

- системата поглъща или отделя количество топлина  $Q(J)$ ;
- външни сили извършват механична работа  $A_B$  върху системата.

При наличие и на двете причини изменението на вътрешната енергия ще бъде:

$\Delta U = Q + A_B$ ; (в съответствие с 3-тия принцип на Нютон ако външна сила извършва работа  $A_B$  върху дадено тяло, то самото тяло противодейства на тази сила и извършва отрицателна работа, т.е.  $A_B = -A$ , където  $A$  е работата на дадената термодинамична система против външните сили. В такъв случай изменението на вътрешната енергия се определя от израза  $\Delta U = Q - A$  или  $Q = \Delta U + A$ , който е известен като **първи принцип на термодинамиката**. Работата може да се изрази чрез налягането  $P$  и изменението на обема  $\Delta V$ :  $A = P\Delta V \rightarrow Q = \Delta U + P\Delta V$ .

2. Специфичен топлинен капацитет на веществата. Моларни топлинни капацитети при идеални газове – уравнение на Майер

За всяко вещество (независимо от агрегатното му състояние - газ, течност или твърдо тяло) се въвежда величината **специфичен топлинен капацитет**, който

зависи от веществото, от което е изградено тялото и се определя от формулата:

$C = \Delta Q / m \Delta T$  (J/kg.K);  $\Delta Q$  е погълнато или отделено количество топлина от веществото,  $m$  е неговата маса, а  $\Delta T$  е изменението на температурата.

Специфичният топлинен капацитет определя количеството топлина, което се поглъща или отдава от единица маса вещество при изменение на температурата му с 1 K.

За идеалните газове се въвежда величината моларен топлинен капацитет:

$C_m = \Delta Q / (m/\mu) \Delta T$  (J/mol.K), където  $m/\mu$  е броят молове, които се съдържат в дадена маса  $m$ ; за термодинамична система от 1mol идеален газ

$$C_m = \Delta Q / \Delta T, \quad m/\mu = 1.$$

В дадена термодинамична система идеален газ може да се извършват два вида термодинамични процеси, при които температурата се променя: изохорен и изобарен (при изотермния процес  $T = \text{const}$ ). За тези процеси се въвеждат два моларни топлинни капацитета (за 1 mol газ) - моларен топлинен капацитет при постоянен обем  $C_V$  и моларен топлинен капацитет при постоянно налягане  $C_P$ :

$$(V = \text{const}) \rightarrow (C_V = \Delta Q / \Delta T = (\Delta U + P \Delta V) / \Delta T; C_V = \Delta U / \Delta T \text{ (за изохорен процес } \Delta V = 0));$$

$$(P = \text{const}) \rightarrow C_P = \Delta Q / \Delta T = (\Delta U + P \Delta V) / \Delta T = \Delta U / \Delta T + R \Delta T / \Delta T = C_V + R; C_P = C_V + R.$$

Връзката между двата моларни топлинни капацитета  $C_P = C_V + R$  е известна като уравнение на Майер ( $C_P > C_V \rightarrow C_P - C_V = R$ ).

За най-простата система от 1 mol идеален газ  $C_V = \Delta U / \Delta T$ ;  $\Delta U = C_V \Delta T$ ;  $m/\mu = 1$ ; за  $m/\mu \neq 1 \rightarrow \Delta U = (m/\mu) C_V \Delta T$ ; ако в дадена система  $T = \text{const}$ ;  $\Delta T = 0 \rightarrow \Delta U = 0$ .

### 3. Адиабатен процес – уравнение на Поасон

Освен разглежданите досега **изотермодинамични** процеси (изотермен, изохорен и изобарен) важно значение в термодинамиката имат още един вид процеси, които се наричат **адиабатни - протичат при отсъствие на топлообмен между термодинамичната система и околната среда**. В този случай системата не получава и не отдава количество топлина, тя е термично изолирана,

т.е.  $Q = \text{const}$ ;  $\Delta Q = 0$ . От първия принцип на термодинамиката получаваме:

$$Q = \Delta U + A = 0 \rightarrow A = -\Delta U \text{ (} -A = \Delta U \text{)}. \text{ Вижда се, че ако системата извършва работа}$$

против външните сили нейната вътрешна енергия намалява, и обратно – когато върху системата се извършва работа, вътрешната ѝ енергия се увеличава. За да бъде един процес адиабатен, той трябва да протича толкова бързо, че да не може системата да осъществи топлообмен с околната среда.

Уравнението, което описва тези процеси, е изведено от Поасон и определя връзката между параметрите налягане и обем за даден адиабатен процес:

$PV^\gamma = \text{const}$ , където  $\gamma = C_p/C_v > 1$  се нарича константа на Поасон.

#### 4. Работа при различните термодинамични процеси

Ще определим работата, която се извършва при различните термодинамични процеси.

a) Изохорен процес:  $V = \text{const}$ ;  $\Delta V = 0$ ;  $A = P\Delta V = 0$ ;

b) Изобарен процес:  $P = \text{const}$ ;  $\Delta P = 0$ ;  $A = P\Delta V = P(V_2 - V_1)$ ;

c) Изотермен процес:  $T = \text{const}$ ;  $\Delta T = 0$ ;  $A = (m/\mu)RT \ln V_2/V_1$  (за  $m/\mu \neq 1$ );

$$A = RT \ln V_2/V_1 \text{ (за } m/\mu = 1\text{);}$$

d) Адиабатен процес:  $Q = \text{const}$ ;  $\Delta Q = 0$ ;  $A = - (m/\mu)C_v(T_2 - T_1) = (m/\mu)C_v(T_1 - T_2)$ ;

$$A = - C_v(T_2 - T_1) = C_v(T_1 - T_2) \text{ (за } m/\mu = 1\text{).}$$

Индексите 1 и 2 се отнасят за началното и крайното състояние на системата, в която протича съответният термодинамичен процес.

**Задачи:** стр. 70 – 2; 3; 6;

**Въпроси с избираем отговор:** стр. 68 – 3; 4;

71 – 13; 16

69 – 9; 10; 11; 13; 15; 17

**Зад. 2:** В термодинамична система протича процес, при който външни сили извършват положителна работа 0,2 kJ върху системата, а системата по време на процеса отдава 0,3 kJ количество топлина на околната среда. Какво е изменението на вътрешната енергия на системата при този процес?

$$A_B = 0,2 \cdot 10^3 = 200 \text{ J}; Q = - 0,3 \cdot 10^3 = - 300 \text{ J}; \Delta U = ?$$

---

$$\Delta U = - 300 + 200 = -100 \text{ J}.$$

**Зад. 3:** Определете работата за разширение на 20 l газ при изобарно нагряване от 200 K до 300 K, ако налягането на газа е 80 kPa.

$$V = 20 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3; T_1 = 200 \text{ K}; T_2 = 300 \text{ K}; P = \text{const} = 80 \cdot 10^3 \text{ Pa}; A = ?$$

---

$$V_1/T_1 = V_2/T_2; V_2 = V_1 T_2 / T_1 = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 3 \cdot 10^2 / 2 \cdot 10^2 = 3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3; A = P(V_2 - V_1);$$

$$A = 10^{-2} (3 - 2) \cdot 800 \cdot 10^2 = 800 \text{ J}.$$

**Зад. 6:** В цилиндър под безтегловно бутало се намира 56 g азот при температура 100°C. Да се определи извършената от азота работа, ако той е нагрят изобарно до температура 200°C (моларната маса на газа е 28 kg/kmol).

$$m = 56 \cdot 10^{-3} \text{ kg}; T_1 = 373 \text{ K}; T_2 = 473 \text{ K}; P = \text{const}; \mu = 28 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}; A = ?$$


---

$$A = P(V_2 - V_1) = ? \quad PV_1 = (m/\mu)RT_1; PV_2 = (m/\mu)RT_2; V_1 = mRT_1/P\mu; V_2 = mRT_2/P\mu;$$

$$A = (mR/\mu)(T_2 - T_1) = 56 \cdot 10^{-3} \cdot 8,31 \cdot 100 / 28 \cdot 10^{-3} = 2,8 \cdot 31 \cdot 100 = 1662 \text{ J}.$$

**Зад. 13:** За да се повиши температурата на тяло с маса 600 g с 10°C е необходимо количество топлина 2,7 kJ. Определете специфичния топлинен капацитет на веществото, изграждащо това тяло.

$$Q = 2,7 \cdot 10^3 \text{ J}; m = 600 \cdot 10^{-3} \text{ kg} = 6 \cdot 10^{-1} \text{ kg}; \Delta t^\circ\text{C} = \Delta T \text{ K} = 10 \text{ K}; C = ?$$


---

$$C = Q/m\Delta T = 2,7 \cdot 10^3 / 6 \cdot 10^{-1} \cdot 10 = 450 \text{ J/(kg.K)}.$$

**Зад. 16:** В дадена термодинамична система се извършва адиабатен процес, при който обемът на газа се увеличава 2 пъти. Да се определи изменението на налягането спрямо началното, ако константата на Поасон е 1,4.

$$V_1; V_2 = 2V_1; \gamma = 1,4; P_2/P_1 = ?$$


---

$$P_1 V_1^\gamma = P_2 V_2^\gamma = P_2 (2V_1)^\gamma = P_2 \cdot 2^\gamma \cdot V_1^\gamma; P_2/P_1 = 1/2^{1,4}.$$

**Въпроси с избираем отговор:**

3. Кое от следните твърдения е вярно за първия принцип на термодинамиката?

Първият принцип на термодинамиката изразява:

- a) връзката между температурата и топлината; b) закона за запазване на масата;
- c) закона за запазване на енергията при топлинните явления;
- d) закон за запазване на количеството топлина. **Верен отговор: c)**

4. Кой от следните процеси с идеален газ НЕ може да бъде изохорен?

- a) нараства температурата на газа; b) газът извършва работа;
- c) нараства вътрешната енергия на газа; d) нараства налягането на газа;

**Верен отговор: b)**

9. При кой процес количеството топлина, получено от идеален газ, се превръща изцяло в механична работа?

a) Изохорен; b) Изотермен; c) Изобарен; d) Адиабатен; **Верен отговор: b)**

10. При кой процес количеството топлина, получено от идеален газ, се изразходва само за увеличаване на вътрешната му енергия?

a) Изохорен; b) Изотермен; c) Изобарен; d) Адиабатен; **Верен отговор: a)**

11. С кой от посочените изрази се определя работата, извършена от идеален газ при изобарно разширение?

a)  $A = R(T_1 - T_2)$ ; b)  $A = P(V_2 - V_1)$ ; c)  $A = 0$ ; d)  $A = (m/\mu)RT \ln(V_2/V_1)$ ;

**Верен отговор: b)**

13. Кой от следните изрази определя връзката между двата моларни топлинни капацитета при газове?

a)  $C_V + C_P = R$ ; b)  $C_V - C_P = R$ ; c)  $C_P - C_V = R$ ; d)  $C_V/C_P = R$ ; **Верен отговор: c)**

15. Уравнението, описващо адиабатен процес, е:

a)  $PV^\gamma = \text{const}$ ; b)  $PV^\gamma = 0$ ; c)  $PV^{\gamma-1} = \text{const}$ ; d)  $PV = \text{const}$ ; **Верен отговор: a)**

17. Кой процес в една система се нарича адиабатен?

a) Който протича при постоянен обем; b) Който протича при постоянна температура; c) Който протича при постоянно налягане;

d) При който системата не обменя количество топлина с други системи.

**Верен отговор: d)**

3-ти час: III. Втори принцип на термодинамиката. Цикъл на Карно. Ентропия

1. Втори принцип на термодинамиката – формулировка на Клаузиус

Друг основен принцип в термодинамиката, който определя кои процеси в дадена термодинамична система са възможни и кои не са възможни, е вторият принцип на термодинамиката. Той определя и посоката, в която протичат естествените процеси. Известни са няколко различни формулировки на този принцип. Една от формулировките е на Клаузиус – **топлината в естествени**

**условия преминава винаги от топло към студено тяло.** Пренасянето на топлина в обратна посока (от студено към топло тяло) е невъзможно и може да бъде осъществено само чрез външна намеса (по изкуствен път).

2. Цикъл на Карно – математическа формулировка на втория принцип на термодинамиката

Друга по-точна формулировка на втория принцип на термодинамиката е свързана с топлинните машини – устройства, които преобразуват топлинната енергия в механична работа. В основата на всички топлинни машини е **идеализираният кръгов процес на френския инженер Карно, който се състои от два изотермни и два адиабатни процеса** и има най-голям коефициент на полезно действие (КПД). КПД на една топлинна машина се определя от отношението на полезната работа  $A$ , извършена от машината при един цикъл (съставен от четирите процеса – 2 изотермни и 2 адиабатни), към погълнатото количество топлина  $Q_1$  и се означава с  $\eta$ :

$\eta = A/Q_1 \rightarrow$  очевидно е, че ако цялото количество топлина се превръща в работа, КПД ще бъде равен на единица; такъв двигател ще бъде идеален, но не е възможно да се създаде; погълнатото количество топлина е винаги по-голямо от извършената работа, а това означава, че винаги  $\text{КПД} < 1$ .

За реалните топлинни машини КПД е винаги по-малък от този на идеализирания цикъл на Карно.

КПД на топлинна машина, работеща по цикъла на Карно, може да се изрази чрез три различни формули, които могат да се обединят:

$\eta = A/Q_1 = (T_1 - T_2)/T_1 = (Q_1 - Q_2)/Q_1 < 1$ , където  $T_1$  и  $T_2$  са съответно температурите на нагревателя и охладителя ( $T_1 > T_2$ ), а  $Q_1$  и  $Q_2$  – погълнатото и отдадено количество топлина при един цикъл на машината. От формулата се вижда, че ако  $T_1 = T_2$ ,  $\eta = 0$ . От този факт следва изводът, че не е възможно построяването на топлинна машина без охладител ( $T_1 \neq T_2$ ).

Цикълът на Карно дава математическата формулировка на втория принцип на термодинамиката: **не е възможно да се построи периодично действаща топлинна машина, която да превръща изцяло топлинната енергия в механична работа (винаги  $A < Q_1$ ).**

3. Ентропия – еднозначна функция на състоянието на дадена термодинамична система; означава се с  $S$  (J/K)

Изменението на ентропията се определя от количеството топлина, което дадена система получава или отдава при една определена температура:  $dS=dQ/T$ .

**Формулировката на втория принцип чрез ентропията гласи, че в изолирана термодинамична система са възможни само два вида процеси – обратими (при които ентропията се запазва постоянна) и необратими (при които ентропията нараства), т.е.  $\Delta S \geq 0$ .**

От горното неравенство може да се направи изводът: в реалните системи, където протичат необратими процеси, ентропията винаги нараства ( $\Delta S > 0$ ); в идеализираните системи, където протичат обратими процеси, ентропията се запазва постоянна ( $S = \text{const}$ ;  $\Delta S = 0$ ). Според тази формулировка процесите в термодинамиката могат да се разделят на няколко групи: **естествени** (ентропията нараства), **идеализирани** (ентропията не се променя) и невъзможни (ентропията намалява  $S < 0$ ). Последните процеси не могат да протичат спонтанно, затова се наричат и **неестествени** (протичат само по изкуствен път – чрез външна намеса).

**Задачи:** стр. 76 – 1;      **Въпроси с избираем отговор:** стр. 75 – 1; 3; 5;

77 – 4; 5; 7; 8; 11

76 – 7; 10

**Зад. 1:** Двигател с вътрешно горене има КПД 28% при температура на изгаряне на горивото 1200 K и температура на изхвърлените газове 720 K. Колко процента КПД на идеалната топлинна машина на Карно е по-голям от този на двигателя?

$$\eta = 28\% = 0,28; T_1 = 1200 \text{ K}; T_2 = 720 \text{ K}; \Delta\eta = \eta_K - \eta = ?$$

---

$$\eta_K = (T_1 - T_2)/T_1 = (1200 - 720)/1200 = 0,4 = 40\%; \Delta\eta = 0,4 - 0,28 = 0,12 = 12\%.$$

**Зад. 4:** Топлинна машина извършва полезна работа 70 kJ за един цикъл. Температурата на нагревателя е 100°C, а на охладителя - 0°C. Определете КПД, полученото и отдадено количество топлина за един цикъл.

$$A = 70 \cdot 10^3 \text{ J}; T_1 = 273 + 100 = 373 \text{ K}; T_2 = 273 \text{ K}; \eta = ?; Q_1 = ?; Q_2 = ?$$

---

$$\eta = (T_1 - T_2)/T_1 = 100/373 = 0,27; \eta = A/Q_1 \rightarrow Q_1 = A/\eta = 70 \cdot 10^3 / 0,27 = 2,6 \cdot 10^5 \text{ J};$$

$$\eta = (Q_1 - Q_2)/Q_1; \eta Q_1 = Q_1 - Q_2; Q_2 = Q_1(1 - \eta) = 2,6 \cdot 10^5 (1 - 0,27) = 1,9 \cdot 10^5 \text{ J}.$$

**Зад. 5:** Газ получава количество топлина от нагревателя 4 kJ за един цикъл.

Каква работа извършва газът за целия цикъл, ако КПД е 0,1 ?

$$Q_1 = 4 \cdot 10^3 \text{ J}; \eta = 0,1; A = ?$$

---

$$\eta = A/Q_1 \rightarrow A = \eta Q_1 = 0,1 \cdot 4 \cdot 10^3 = 400 \text{ J}.$$

**Зад. 7:** Газ извършва цикъл на Карно. Температурата на нагревателя е 4 пъти по-висока от тази на охладителя. Каква част от количеството топлина, получено за един цикъл от нагревателя, се отдава на охладителя?

$$T_1 = 4T_2; Q_2/Q_1 = ?$$

---

$$\eta = 1 - T_2/T_1 = 1 - Q_2/Q_1 \rightarrow T_2/T_1 = Q_2/Q_1 = T_2/4T_2 = Q_2/Q_1; 1/4 = Q_2/Q_1; Q_2 = Q_1/4.$$

**Зад. 8:** Газ извършва цикъл на Карно. Температурата на нагревателя е 3 пъти по-висока от тази на охладителя. Нагревателят предава на газа топлина 42 J. Каква работа извършва газът при този цикъл?

$$T_1 = 3T_2; Q_1 = 42 \text{ J}; A = ?$$

---

$$\eta = 1 - T_2/T_1 = 1 - T_2/3T_2 = 1 - 1/3 = 2/3; \eta = A/Q_1 = 2/3 \rightarrow A = 2Q_1/3 = 2 \cdot 42/3 = 28 \text{ J}.$$

**Зад. 11:** Нагревателят на топлинна машина, работеща по цикъла на Карно, има температура 227°C. Каква е температурата на охладителя, ако за всеки килоджаул топлина, получена от нагревателя, машината извършва работа 170 J?

$$T_1 = 273 + 227 = 500 \text{ K}; Q_1 = 1 \text{ kJ} = 10^3 \text{ J}; A = 170 \text{ J}; T_2 = ?$$

---

$$\eta = A/Q_1 = 170/10^3 = 170 \cdot 10^{-3} = 0,17; \eta = 1 - T_2/T_1 = 0,17 \rightarrow T_2/T_1 = 0,83; T_2 = 0,83 \cdot T_1;$$

$$T_2 = 0,83 \cdot 500 = 415 \text{ K}.$$

**Въпроси с избираем отговор:**

1. Работното вещество в дадена топлинна машина извършва цикъл на Карно.

Каква е извършената работа от работното вещество?

- a) по-голяма от погълнатото количество топлина;
- b) по-малка от погълнатото количество топлина;
- c) по-голяма или по-малка, в зависимост от температурата на нагревателя;
- d) равна на полученото количество топлина от нагревателя. **Верен отговор: b)**

3. Какви процеси участват в идеализирания цикъл на Карно?

- a) 2 изотермни и 2 изохорни; b) 2 изотермни и 2 изобарни;



с) 2 адиабатни и 2 изотермни; d) 2 адиабатни и 2 изобарни; **Верен отговор: с)**

5. Кое от посочените твърдения НЕ е вярно?

а) вторият принцип на термодинамиката определя посоката, в която протичат естествените процеси; б) ентропията е функция на състоянието на термодинамичната система; с) не е възможно да се построи топлинна машина без охладител; d) КПД на топлинна машина, работеща по цикъла на Карно, е минималният възможен; **Верен отговор: d)**

7. Предаването на топлина от студено към топло тяло в естествени условия противоречи на:

а) втория принцип на механиката; б) втория принцип на термодинамиката; с) първия принцип на термодинамиката; d) закона за запазване на енергията;

**Верен отговор: б)**

10. Как се изменя ентропията в дадена термодинамична система, ако в нея протича произволен необратим процес:

а) намалява; б) не се променя; с) нараства; d) зависи от вида на процеса;

**Верен отговор: с)**