9.2 TERMODYNAMIKA

Učebné ciele

Študent by mal zvládnuť učivo predpísaného rozsahu a hĺbky. Pochopiť význam pojmu vnútorná energia, teplo, práca plynu a mal by dokázať analyzovať základné termodynamické deje. Použiť prvú vetu termodynamickú pri riešení úloh a riešiť úlohy spojené s premenou tepla na prácu počas Carnotovho cyklu a pri zmene entrópie termodynamickej sústavy.

9.2.1 Vnútorná energia plynov a prvá veta termodynamická

Majme častice podliehajúce vzájomnému pôsobeniu i pôsobeniu vonkajších síl. Takými časticami sú častice tvoriace tuhé, kvapalné alebo plynné teleso. Označme

E_{pij} - vzájomnú potenciálnu energiu medzi časticami i, j .

Celková vnútorná potenciálna energia sústavy potom je

$$E_{Pint} = \sum_{\text{páry}} E_{Pij} = E_{P1,2} + E_{P1,3} + \ldots + E_{P2,3} + E_{P2,4} + \ldots \quad .$$

Celková vnútorná energia sústavy

$$U = E_{Kint} + E_{Pint} \; ,$$

kde E_{Kint} - je celková vnútorná kinetická energia sústavy. Podľa zákona zachovania energie sa táto nemení, ak je sústava izolovaná.

Majme častice podliehajúce vzájomnému pôsobeniu i pôsobeniu vonkajších síl. Takými časticami sú častice tvoriace tuhé, kvapalné alebo plynné teleso. Označme

E_{pij} - vzájomnú potenciálnu energiu medzi časticami i, j .

Celková vnútorná (interná) potenciálna energia sústavy potom je

$$E_{Pint} = \sum_{\text{páry}} E_{Pij} = E_{P1,2} + E_{P1,3} + \ldots + E_{P2,3} + E_{P2,4} + \ldots \quad .$$

Celková vnútorná energia sústavy

$$U = E_{Kint} + E_{Pint} \; , \qquad (9.2.1.1)$$

kde E_{Kint} je celková vnútorná kinetická energia sústavy.

Podľa zákona zachovania energie sa táto nemení, ak je sústava izolovaná.

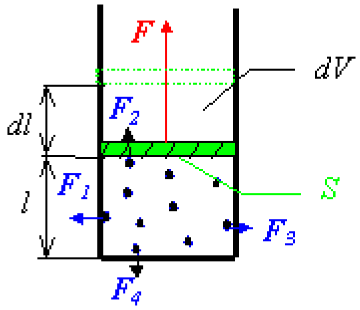
Sledujme teraz plyn uzavretý vo valci s pohyblivým piestom, ako ukazuje obrázok 7.2.1.1, kde

S - je plošný obsah piesta,

F - je veľkosť zložky výslednice síl nárazov častíc na piest spadajúcich do smeru pohybu piesta,

F_1, F_2, F_3, F_4, - sú veľkosti síl vytvorené nárazom častíc plynu na steny nádoby,

dl - je veľkosť elementu dĺžky posunutia piesta,



Obr. 7.2.1.1. Práca plynu v uzavretej nádobe

dV - je elementárna zmena objemu plynu pri jeho posunutí o dl.

Zapíšme tlakovú silu plynu vzťahom

$$\mathbf{F} = p\mathbf{S} \quad , \qquad (9.2.1.2)$$

kde $\mathbf{S}$ je vektor priradený ploche S, má smer kolmý na túto plochu a jeho veľkosť sa rovná veľkosti plochy. Plynom vykonaná práca pri posunutí piesta o dl je

$$dW' = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{l} \quad ,$$

kde $d\mathbf{l}$ je vektor elementu posunutia piesta silou $\mathbf{F}$.

Po dosadení za $\mathbf{F}$ zo vzťahu 9.2.1.2 prácu vypočítame

$$dW' = p\mathbf{S} \cdot d\mathbf{l} = pdV \quad .$$

Ak zmeníme objem z hodnoty V_0 na V_1, celková práca vykonaná plynom je

$$W' = \int_{V_0}^{V_1} pdV \quad ,$$

a vonkajšia práca, tj. práca plynu dodaná je

$$W = -W' = -\int_{V_0}^{V_1} p dV$$.

Častice tvoriace látku (atómy, molekuly, ióny, ...) konajú chaotický pohyb, ktorého prejavy ako prvý pozoroval anglický botanik Brown, keď pod mikroskopom sledoval trhavý pohyb peľového zrnka vo vode. Pohyb zrnka bol neskoršie vysvetlený ako dôsledok nepravidelnosti nárazov častíc vody na zrnko. Takýto pohyb častíc látky (nielen kvapalnej) pomenovali ***tepelný pohyb*** a veličinu, ktorou ho môžeme navonok registrovať - ***teplota.*** Energiu plynu teda môžeme dodať aj prostredníctvom interakcií jednotlivých častíc nepohyblivých stien nádoby s časticami plynu (konaním mikropráce), pričom dochádza k výmene energie medzi časticami. Energia plynu bude dodaná len vtedy, ak energia častíc stien bude vyššia, ako energia častíc plynu. Takto dodanú energiu nemôžeme vyjadriť súčinom vonkajšej sily a dráhy a nazveme ju ***teplo.***

Teplo dodané sústave zvonka považujeme za kladné +*Q*, teplo uvoľnené sústavou považujeme za záporné -*Q*. Celková energia dodaná sústave môže obsahovať obe zložky, teda

$$W_{ext} = W + Q.$$

Ak sústava energiu okoliu odovzdáva

$$W_{sús} = W' - Q.$$

Využitím poznatkov o zachovaní energie (vzťah 9.2.1.1), pre zmenu vnútornej energie platí

$$U_1 - U_0 = Q + W$$.

Toto matematické vyjadrenie zákona zachovania energie nazývame ***prvá veta termodynamická.*** Slovne : ***Prírastok vnútornej energie sústavy sa rovná súčtu sústave dodaného tepla a dodanej práce.***

Pre extrémne malé zmeny *U, Q* a *W* nadobúda prvá veta termodynamická tvar

$$dU = dQ + dW = dQ + pdV \qquad (9.2.1.3)$$

***Príklad* 9.2.1.1**

Ako sa zmení vnútorná energia plynu uzavretého v nádobe s pohyblivým piestom, ak sa piest posunul priamočiaro a zväčšil svoj objem za stáleho tlaku p = 0,1 MPa z objemu V_0 = 100 l na V_1 = 150 l a zároveň ohrievaním prijal plyn teplo Q = 10 kJ.

Riešenie :

Teplo dodané plynu sa využije na vykonanie práce plynom a na zvýšenie jeho vnútornej energie. Pri riešení využijeme prvú vetu termodynamickú, vzťah 9.2.1.3 , v tvare

$$dU = dQ - dW' = dQ - pdV$$.

Obe strany rovnice zintegrujeme v hraniciach stanovených zadaním a za podmienky konštantného tlaku

$$\int_{U_0}^{U_1} dU = \int_0^Q dQ - p\int_{V_0}^{V_1} dV$$

$$U_1 - U_0 = \Delta U = Q - p\left(V_1 - V_0\right)$$

$$\Delta U = 10^4\,J - 1\cdot 10^5\,Pa\left(0{,}15m^3 - 0{,}1m^3\right)$$

$$\Delta U = 5\cdot 10^3\,J\ .$$

Vnútorná energia plynu sa zvýši o 5.10^3 *J.*

9.2.2 Tepelné kapacity látok, skupenské teplá

Majme telesá z rôznych druhov látok napr. kvapalné teleso - destilovaná voda v nádobe, plynné teleso - kyslík v balóne, tuhé teleso - medená kocka, ... , všetky rovnakej hmotnosti. Pokusom by sme zistili, že hoci majú telesá hmotnosť rovnakú, na zvýšenie ich teploty o rovnakú hodnotu za rovnakých vonkajších podmienok je potrebné rôzne množstvo tepla. Vlastnosť, ktorou sa tieto telesá od seba navzájom odlišujú a ktorú sme pokusom prezentovali nazývame ***tepelná kapacita*** telies.

V paragrafe 8.1.4 sme sa zaoberali tepelnou kapacitou ideálneho plynu, pričom sme zistili, že tepelnú kapacitu je potrebné sledovať aj v závislosti od podmienok, za akých dodávame plynu teplo. Podľa toho rozlišujeme tepelnú kapacitu pri konštantnom tlaku a pri konštantnom objeme.

Tieto kapacity sme vztiahli na *jeden kilogram* látky, čím sme zaviedli hmotnostnú tepelnú kapacitu c_P, c_V , alebo na *jeden mól* látky, čím sme zaviedli molárne tepelné kapacity C_P, C_V. Podobne zavádzame aj tepelné kapacity pre kvapaliny a tuhé látky.

Súvis medzi kapacitami C_P a C_V udáva tzv. *Mayerov vzťah*

$$C_P = C_V + R\ .$$

Hmotnostné skupenské teplo látky l je množstvo tepla, ktoré je potrebné dodať tuhej látke s jednotkovou hmotnosťou, aby zmenila svoje skupenstvo. Celkové dodané teplo je vtedy

$$Q = ml\ .$$

9.2.3 Práca plynu pri termodynamických procesoch

V technickej praxi sa často stretávame so situáciou, kedy plyn uzavretý v nádobe s pohyblivou stenou (piestom) tento piest posunie v dôsledku svojej expanzie alebo kompresie. (Pozri obr. 7.2.1.1 a paragraf 9.2.1.) Ak plyn posunul piest, hovoríme, že vykonal prácu. Pri jednotlivých termodynamických procesoch má práca svoje špecifické vyjadrenie.

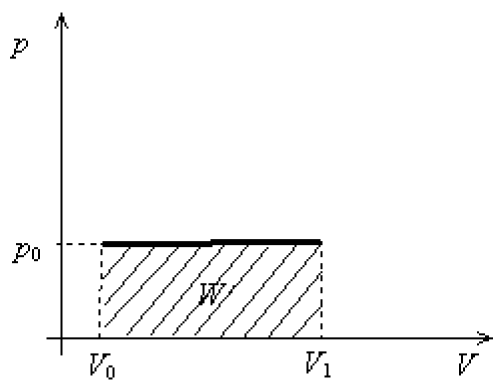
a) ***Izobarická expanzia*** **:** *p* = konštanta.

Prácu vykonanú plynom vypočítame

$$W' = \int_{V_0}^{V_1} p\,dV = p\int_{V_0}^{V_1} dV \quad .\qquad (9.2.3.1)$$

Po vykonaní predpísanej integrácie

$$W' = p\left(V_1 - V_0\right).$$



Obr. 7.2.4.1. Práca plynu pri izobarickom deji

Plynom vykonaná práca sa rovná súčinu konštantného tlaku a rozdielu konečného a počiatočného objemu plynu. Práca je úmerná vyšrafovanej ploche obdĺžnika na obrázku 7.2.4.1.

b) ***Izotermická expanzia*** **:** *T* = konštanta.

Pri sledovaní plynom vykonanej práce budeme vychádzať zo vzťahu 9.2.3.1, kde tlak vyjadríme zo stavovej rovnice v tvare

$$p = \frac{nRT_0}{V}$$

a vo vzťahu vyjmeme pred integrál veličiny nemeniace sa v procese integrovania

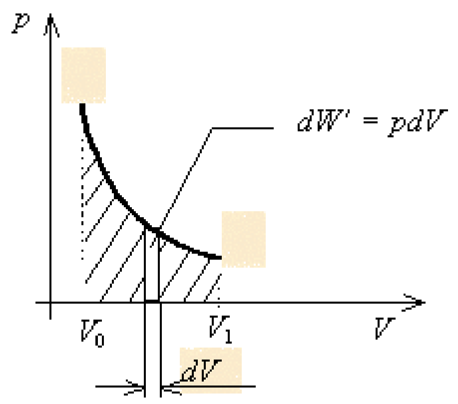
$$W' = nRT_0 \int_{V_0}^{V_1} \frac{1}{V} dV$$.

Po integrácii vzťahu v predpísaných medziach

$$W' = nRT_0 \ln \frac{V_1}{V_0}$$. (9.2.3.2)

Pri konštantnej teplote sústavy sa vnútorná energia nemení. Teplo dodané sústave sa prejaví len vo forme práce, ktorú sústava vykonala.

Veľkosť sústavou vykonanej práce za daných podmienok je úmerná vyšrafovanej ploche na obrázku č. 7.2.4.2 .



Obr. 7.2.4.2. Práca plynu pri izotermickom deji

c) ***Adiabatická expanzia*** **:** $dW' = -dU$

Ak počítame prácu vykonanú plynom pri adiabatickom deji, jej veľkosť je daná vzťahom

$$W' = \int_{V_0}^{V_1} p\, dV$$.

Z Poissonovho vzťahu vyjadríme tlak

$$p = \frac{p_0 V_0^r}{V^r}$$

a dosadíme do poslednej rovnice

$$W' = p_0 V_0^r \int_{V_0}^{V_1} \frac{1}{V^r} dV$$.

Po zintegrovaní v predpísaných hraniciach

$$W' = \frac{p_0 V_0^{\gamma}}{1-\gamma}\left(V_1^{1-\gamma} - V_0^{1-\gamma}\right) .$$

Keďže Poissonovu rovnicu môžeme napísať aj v tvare

$$p_0 V_0^{\gamma} = p_1 V_1^{\gamma} = p V^{\gamma} = \ldots ,$$

posledný vzťah nadobudne tvar

$$W' = \frac{1}{1-\gamma}\left(p_1 V_1^{\gamma} V_1^{1-\gamma} - p_0 V_0^{\gamma} V_0^{1-\gamma}\right) = \frac{p_1 V_1 - p_0 V_0}{1-\gamma} . \qquad (9.2.3.3)$$

Prácu vykonanú pri adiabatickej expanzii plynu môžeme vypočítať pomocou konečných a počiatočných hodnôt stavu objemu a tlaku plynu. Uplatnením stavovej rovnice v tvaroch $p_0V_0 = nRT_0$ a $p_1V_1 = nRT_1$ môžeme vzťah napísať v tvare

$$W' = \frac{nR}{1-\gamma}\left(T_1 - T_0\right) . \qquad (9.2.3.4)$$

Upravme teraz Mayerov vzťah

$$R = C_P - C_V = Mc_P - Mc_V = M(c_P - c_V) = M(\gamma c_V - c_V) = - Mc_V(1 - \gamma)$$

a dosaďme do rovnice 9.2.3.4 . Ak vyjadríme aj látkové množstvo $n = m/M$ a rovnicu upravíme, dostávame vzťah

$$W' = mc_V\left(T_0 - T_1\right) .$$

Vzťah nám hovorí, že prácu vykonanú plynom pri adiabatickej expanzii môžeme vypočítať aj pomocou rozdielu počiatočnej a konečnej hodnoty teploty a práca je konaná na úkor vnútornej energie plynu. V praxi za adiabatické deje považujeme aj deje prebiehajúce veľmi rýchlo. Tak rýchlo, že nestihla prebehnúť výmena tepla s okolím.

Príklad 9.2.3.1

Aká veľká práca je potrebná na stlačenie kyslíka uzavretého v nádobe s pohyblivým piestom objemu $V_0 = 0{,}5\,m^3$ a tlaku $p_0 = 10^5$ Pa na tlak $p_1 = 3{,}5.10^5$ Pa, ak stláčanie vykonáme izotermicky ?

Riešenie :

a) Pri izotermickom deji je vnútorná energia konštantná a pre riešenie príkladu vyhovuje rovnica 9.2.3.2, v ktorej využijeme stavovú rovnicu $nRT_0 = p_0 V_0$ a dostávame

$$W = -W' = -p_0 V_0 \ln \frac{V_1}{V_0} .$$

V rovnici sme vyjadrili vzťah medzi prácou vykonanou plynom a prácou vykonanou vonkajšími silami zmenou znamienka. Využitím stavovej rovnice pre konštantné veličiny *n, R, T*, nahradíme vo vzťahu

$$\frac{V_1}{V_0} = \frac{p_0}{p_1} .$$

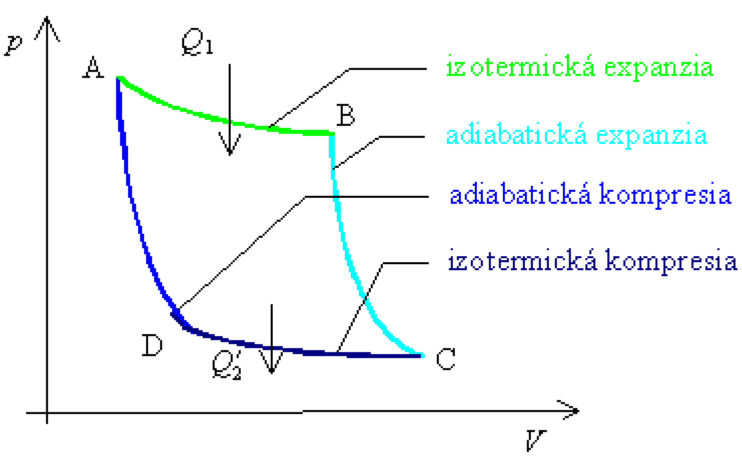
Potom

$$W = -p_0 V_0 \ln \frac{p_0}{p_1} = p_0 V_0 \ln \frac{p_1}{p_0} = 10^5\, Pa \cdot 0{,}5 m^3 \ln \frac{3{,}5 \cdot 10^5\, Pa}{10^5\, Pa} = 0{,}626 \cdot 10^5\, J .$$

Na izotermické stlačenie kyslíka v nádobe je potrebná vonkajšia práca 0,626 . 10^5 J.

9.2.4 Carnotov cyklus

Rozpínajúci sa plyn môže vykonávať mechanickú prácu na úkor svojej vnútornej energie alebo na úkor tepla odoberaného z okolitých telies (z ohrievača). Také zariadenie, ktoré je schopné meniť tepelnú energiu na mechanickú prácu je napríklad parný stroj. Samotný pohybujúci sa piest vo valci však ešte nemôžeme považovať za tepelný stroj, lebo po určitej dobe piest dosiahne okraj valca a zastaví sa. Pod pojmom stroj rozumieme také zariadenie, ktoré je schopné vykonávať prácu neobmedzene dlho. Je teda potrebné piest vrátiť späť, pričom plyn odovzdá určité teplo okolitým telesám s nižšou teplotou (chladiču) a dej zopakovať. Piest stroja musí vykonávať periodický pohyb. Plyn dá do pohybu piest, ktorý sa po takomto periodickom deji vráti opäť do východiskového stavu - vykoná ***kruhový dej.***



Obr. 7.2.5.1. Vratný Carnotov cyklus

Kruhový dej v plyne môžeme uskutočniť viacerými postupmi. Najvyššiu účinnosť však dosiahneme realizáciou tzv. ***vratného Carnotovho cyklu*** (obr. 7.2.5.1).

Celý Carnotov cyklus je zložený z dvoch izotermických a dvoch adiabatických dejov, počas ktorých prácu vykonanú plynom opisujú nasledujúce rovnice:

– izotermický dej medzi bodmi AB : plyn sa rozpína z objemu V_A na V_B, pričom prácu koná na úkor tepla dodaného zvonku pri konštantnej teplote T_1

$$W'_{AB} = nRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} = Q_1 , \qquad (9.2.4.1)$$

– adiabatický dej medzi bodmi BC : rozpínanie plynu pokračuje, ale práca sa koná na úkor vnútornej energie (teplota plynu klesne z T_1 na T_2), lebo teplo dodané zvonka je nulové

$$W'_{BC} = nC_V\left(T_2 - T_1\right) , \qquad (9.2.4.2)$$

– izotermický dej medzi bodmi CD : pri kompresii plynu z objemu V_C na V_D sa pri konštantnej teplote T_2 uvoľní z plynu teplo Q'_2

$$W'_{CD} = nRT_2 \ln \frac{V_D}{V_C} = Q'_2 , \qquad (9.2.4.3)$$

– adiabatický dej medzi bodmi DA : kompresia plynu pokračuje, teplo však nie je odvádzané chladiču, ale sa prejaví zvýšením vnútornej energie plynu, jeho teplota vzrastie z T_2 na T_1

$$W'_{DA} = nC_V\left(T_1 - T_2\right) . \qquad (9.2.4.4)$$

V obrázku a vo vzťahoch 9.2.4.1 až 9.2.4.4 veličina T_1 označuje teplotu ohrievača a T_2 teplotu chladiča parného stroja.

Celková práca vykonaná počas jedného cyklu je úmerná ploche ohraničenej krivkou ABCD a je daná vzťahom

$$W' = W'_{AB} + W'_{BC} + W'_{CD} + W'_{DA} . \qquad (9.2.4.5)$$

Po dosadení rovníc 9.2.4.1 až 9.2.4.4 a zohľadnení skutočnosti, že $nC_V(T_1 - T_2) =$

$- nC_V(T_2 - T_1)$ vidíme, že súčtom prvého a tretieho člena dostaneme nulu a vzťah 9.2.4.5 dostáva tvar

$$W' = nR\left(T_1 \ln \frac{V_B}{V_A} + T_2 \ln \frac{V_D}{V_C}\right) = Q_1 - Q'_2 . \qquad (9.2.4.6)$$

Na prácu pri Carnotovom cykle sa premení tá časť energie, ktorá je rozdielom medzi teplom plynu dodaným Q_1 a z plynu odvedeným Q'_2.

Ako sme už spomenuli, účinnosť Carnotovho cyklu je najvyššia. Vypočítame ju ako podiel energie premenenej na prácu a energie stroju dodanej, teda

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2'}{Q_1} = \frac{W'}{Q_1}$$, resp. $$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$$.

Ak označíme $Q_2 = -Q_2'$, potom

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

alebo po matematickej úprave

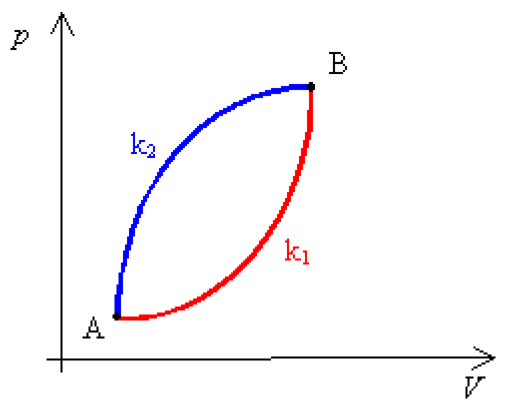
$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0 .$$

Ak podiel Q/T nazveme ***redukované teplo***, vzťah môžeme vyjadriť slovami: ***Súčet redukovaných tepiel prijatých sústavou počas reverzibilného Carnotovho cyklu sa rovná nule.***

Poslednú rovnicu môžeme zovšeobecniť aj na procesy, kedy sústava vratne prijíma teplo viac ako dvakrát

$$\sum_{i}^{N} \frac{Q_i}{T_i} = 0 , \qquad (9.2.4.7)$$

kde N je počet prijatí tepla.



Obr. 7.2.6.2. Reverzibilný kruhový dej

Sledujme kruhový reverzibilný (tj. vratný) dej, ktorý prebehol medzi bodmi A a B po krivkách k_1 a k_2, ako na obrázku 7.2.6.2 . Na základe platnosti rovnice 9.2.4.7, môžeme pre tento kruhový dej rozpísať nasledovne

$$\oint \frac{dQ}{T} = \oint\limits_{\mathrm{ABA}} \frac{dQ}{T} = \int\limits_{\mathrm{Ak_1B}} \frac{dQ}{T} + \int\limits_{\mathrm{Bk_2A}} \frac{dQ}{T} = 0 ,$$

alebo

$$\int\limits_{\mathrm{Ak_1B}} \frac{dQ}{T} = -\int\limits_{\mathrm{Bk_2A}} \frac{dQ}{T} = \int\limits_{\mathrm{Ak_2B}} \frac{dQ}{T} .$$

Na základe posledných vzťahov môžeme usúdiť, že výsledok integrálu nezávisí od spôsobu **ako** sústava prešla zo základného stavu A do stavu B, ale závisí len od týchto stavov. Ak označíme

$$\int_A^B \frac{dQ}{T} = S_{\mathrm{B}} - S_{\mathrm{A}} ,$$

potom veličinu *S* nazývame ***entropiou***. Jednotkou entropie je joule na kelvin [$\mathrm{J.K^{-1}}$]. Jej diferenciál je

$$dS = \frac{dQ}{T} . \qquad (9.2.4.8)$$

Ak prebehne v sústave kruhový dej reverzibilne a sústava sa dostane do východzieho bodu, rovnicu (9.2.4.8) môžeme prepísať do tvaru

$$\oint dS = 0 ,$$

ktorý je považovaný za matematickú formuláciu ***druhej vety termodynamickej***.

Druhá veta termodynamická umožnila entropiu *S* definovať len ako funkciu stavu sústavy.

Pri sledovaní entropie ***adiabatických*** *(dQ=0)* ***reverzibilných dejov*** zapíšeme zmenu entropie nasledovne

$$dS = \frac{dQ}{T} = 0 .$$

Pre entropiu pri zmene stavu sústavy z A do B potom platí

$$\int_A^B dS = 0 .$$

Po integrácii a matematickej úprave

$S_B - S_A = 0$

$S_A = S_B$.

Posledý vzťah môžeme slovami vyjadriť: ***Počas adiabatických reverzibilných dejov sa entropia sústavy nemení.***

Kontrolné otázky

1. Čo je vnútorná energia plynu?

2. Čo rozumieme pod pojmom teplo?

3. Ako chápeme potenciálnu energiu častíc pri sledovaní vnútornej energie plynu?

4. Čo sa deje s vnútornou energiou sústavy, ak sa teplota sústavy zvyšuje?

5. Akými zmenami na sústave sa prejaví teplo dodané sústave podľa znenia prvej vety termodynamickej?

6. Čo je tepelná kapacita telesa?

7. Čo je hmotnostná tepelná kapacita telesa?

8. Aký je rozdiel medzi reverzibilným a ireverzibilným procesom?

9. Prečo pri izochorickom deji plyn prácu nemôže konať?

10.. Čo je tepelný stroj?

11. Čím je charakteristický vratný Carnotov cyklus, ak máme na mysli jeho účinnosť?

Úlohy

1. *Termodynamickej sústave bolo dodané 2,1*MJ *tepla, pričom súčasne vykonala vonkajšiu prácu 847,5*kJ. *Vypočítajte, o koľko sa pri tomto deji zvýšila vnútorná energia sústavy?*

   (ΔU=12525,5kJ)

2. *Priemerný tlak vzduchu na piest s plochou 800*cm^2 *počas jedného jeho zdvihu je 1800*kPa. *O akú vzdialenosť sa piest posunie, ak plyn vykoná prácu 57,6*kJ*?(h=0,4*m)

3. *V pracovnom valci máme* $1m^3$ *plynu, ktorý zohrejeme z 0℃ o 20*K. *Akú prácu plyn vykonal, ak dej prebehol pri tlaku 0,2*MPa*? (W′=14652)*

4. *Aká je hmotnostná tepelná kapacita 1 mólu kyslíka, pri stálom objeme a pri stálom tlaku, ak jeho molárna tepelná kapacita je* $M=32.10^{-3}$ kg.mol^{-1}*? (* $c_V=649$J.kg^{-1}.K^{-1}, $c_P=908,6$J.kg^{-1}.K^{-1}*)*

5. *Aká je teplota 1 mólu ideálneho plynu, ak jeho vnútorná energia je 3739*J*? (T=300*K*)*

6. *Do kalorimetra, v ktorom bolo 200*g *vody teplej 18°* C, *sme vložili medený predmet hmotnosti 120*g *rovnakej teploty. Ak do nádoby vpustíme ešte 20*g *vodnej pary teploty 100℃, ustáli sa výsledná teplota sústavy na 71,6℃. Aké je hmotnostné skupenské teplo varu vody? Hmotnostná tepelná kapacita vody je 4186* J.kg^{-1}.K^{-1} *a medi 383* J.kg^{-1}.K^{-1}*.Tepelné straty kalorimetra zanedbávame.(* $l_V=2,25.10^6$ J.kg^{-1} *)*

7. *Izobaricky zohrejme 5*kg *oxidu uhličitého z 10℃ tak, aby počas rozpínania vykonal prácu 49050*J. *Na akú výslednú teplotu sa plyn zohreje? Molárna hmotnosť oxidu uhličitého je* 44.10^{-3} kg.mol^{-1}. *(T=334,9*K*)*

8. *Do nádoby s pevnými stenami umiestnime 20* l *vodíka. Koľko tepla mu musíme dodať, aby sa jeho tlak zvýšil z 5066,25*kPa *na 6079,5*kPa*? Vodík má molárnu hmotnosť* 2.10^{-3} kg.mol^{-1} a *hmotnostnú tepelnú kapacitu 10130* J.kg^{-1}.K^{-1}. *(Q=49,383*kJ *)*

9. *Počas stláčania 5* l *vzduchu z počiatočného tlaku 101*kPa *sa odovzdal okoliu 1*kJ *tepla. Aký mal tlak a aký objem zaberal vzduch po stlačení, ak dej prebiehal izotermicky? (p=731,*88kPa, *V=*$6,9.10^{-4}$ m^3 *)*

10. *Akú prácu vykoná 2,5*m^3 *vzduchu s teplotou 32℃* a tlakom 455962Pa*, keď sa adiabaticky rozopne tak, že jeho teplota klesne na 15℃. Hmotnostná tepelná kapacita vzduchu je 728* J.kg^{-1}.K^{-1} *a molárna hmotnosť je* $28,45.10^{-3}$ kg.mol^{-1}. *(W=158,5*kJ *)*

11. *Vo valci s pohyblivým piestom je pri teplote 273*K *a tlaku 101*kPa *uzavretých 5*m^3 *vzduchu.O koľko musíme zohriať tento plyn, ak má izobaricky vykonať prácu 100*kJ*? (* $\Delta T=54$K *)*

12. *Akú prácu vykonal kyslík s hmotnosťou 0,1*kg*, začiatočnou teplotou 20℃ a tlakom 2*MPa, *ktorý počas rozpínania klesol na hodnotu 1,8*MPa*.? Dej prebiehal a) izochoricky,b) izotermicky,c) adiabaticky.(a) W′=0*J, *b) W′=802*J, *c) W′=580*J *)*

13. *Ako sa má zmeniť teplota ohrievača, ak sa má jeho účinnosť zvýšiť z 35% na 45% a teplota chladiča je 10℃. (* $\Delta T=79,16K$ *)*