

Лекция 2

3. Първи принцип на термодинамиката

Първият принцип на термодинамиката се основава на закона за запазване на енергията. За да се приложи този закон към термодинамичните явления трябва първо да се уточнят видовете енергия, които участват в термодинамичните процеси. Някои от видовете енергия са известни от механиката, а други са характерни за термодинамиката и топлофизиката.

3.1. Работа и механична енергия.

Тези физически величини са дефинирани в механиката, но имат приложение почти във всички области на физиката. Едно тяло извършва работа, ако при своето движение преодолява съпротивлението на определена сила. Затова количествено тя се задава като произведение на силата по разстоянието на което се премества тялото:

$$L = F \cdot s$$

където е L работа, F - силата, която се преодолява при движението и s – изминатия път. Измерителната единица за работа е [N.m] (нютон по метър), за която има специално означение J (Джаул).

Освен работа се дефинира и понятието мощност. Тя се определя като работа извършена за единица време: $N = L/\tau$, като с τ е означено времето. Измерителната единица за мощност е [J/s] (джаул за секунда). За тази измервателна единица също има специално обозначение: W (Ват).

Енергията се дефинира като способност на телата да извършват работа. В този смисъл, енергията и работата са величини от един тип, имат една измервателна единица, но имат различен физически смисъл. Енергията е характеристика на телата (телата притежават енергия), докато работата е величина характеризираща превръщането на енергията от един вид в друг.

Механичната енергия бива два вида: кинетична и потенциална. Кинетичната енергия се нарича още енергия на движението и зависи от скоростта на телата:

$$E_k = \frac{m \cdot w^2}{2},$$

където w е скорост на движение на тялото, m - маса на тялото.

Потенциалната енергия е известна и като енергия на положението. Тя се определя от гравитационните сили, които действат на телата:

$$E_p = m \cdot h \cdot g,$$

където h е височината на която е издигнато тялото и g е земното притегляне (гравитационна константа).

3.2. Топлинна енергия. Теплообмен. Видове теплообмен

Топлинната енергия се определя като мярка за обмен на енергия между тела с различна температура. Тя не може да се разглежда като характеристика на телата, а само като енергия обменена между телата. По същият начин работата в механиката не е характеристика на телата, а само мярка за трансформация на енергията. Енергийното съдържание на телата се характеризира с друга величина – вътрешна енергия.

Топлинна енергия се пренася посредством три основни механизма: топлопроводност, топлопредаване (конвекция) и лъчист теплообмен.

Количествено, топлинната енергия, която поема или отдава едно тяло се определя с така нареченото калориметрично уравнение:

$$Q = m c (T_2 - T_1), \quad (3.1)$$

където Q е пренасяната топлинна енергия, m - масата на тялото, c - специфичен топлинен капацитет, T_1 и T_2 - температури на тялото в началото и края на процеса.

Специфичният топлинен капацитет е материална константа, определяща количеството топлина, която поглъща или отдава тяло с маса 1 kg при изменение на температурата му с 1 °C. Специфичният топлинен капацитет зависи от типа на веществото. Най-голям топлинен капацитет има водата: 4190 [J/kg °K].

Топлинната енергия може да се определя за единица маса:

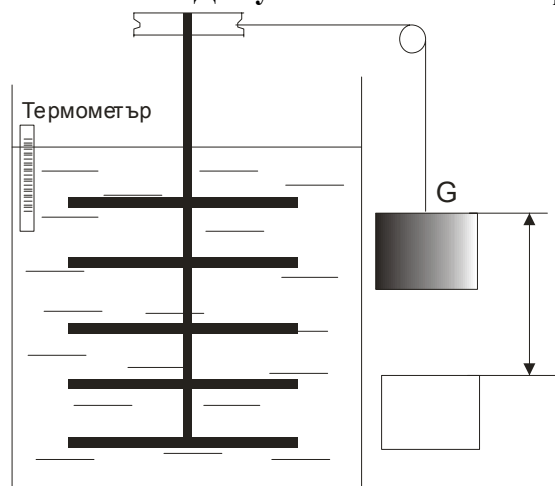
$$\frac{Q}{m} = \frac{c \cdot m \cdot (T_2 - T_1)}{m}$$

Величината Q/m се означава с q и се нарича специфична топлина $q = Q/m$.

Ако се разглежда безкрайно малко изменение на температурата тялото ще отдава или поглъща безкрайно малко количество топлинна енергия:

$$dq = c dT \quad (3.2)$$

3.3. Опит на Джаул. Топлината като форма на енергията.



Фиг.3.1 Опит на Джаул

Джаул провежда опити за преобразуване на механична енергия в топлинна. За целта той използва съд с течност в която се върти специална турбинка (фиг. 3.1). Завъртането на турбинката се осъществява с помощта на товар, който при падането си от определена височина задвижва оста на турбинката. Течността оказва съпротивление срещу въртенето на турбинката в резултат на което се отделя топлина. Тази топлина се определя посредством калориметричното уравнение, като се измерва изменението на температурата на течността. Работата която извършва механичния товар се определя от теглото на товара и разстоянието на което се спуска. Джаул установява, че между

механичната работа и отделената топлина има пропорционалност. По-късно се установява, че коефициентът на пропорционалност е трансформационния коефициент между измервателните единици за работа и топлина. Това означава, че работата и топлината са различни видове на една и съща величина – енергията. В случая се извършва преобразуване на енергията от един вид в друг.

3.4. Вътрешна енергия

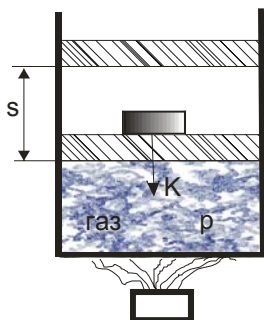
При опита на Джаул механична енергия се превръща в топлина и тя остава в течността. Следователно, енергийното състояние на тялото (течността) се увеличава. Тъй като топлината е понятие, което се използва за преноса на енергията, но не и за енергийното състояние на телата, е въведено понятието вътрешна енергия. Тя се определя от енергийното състояние на частиците на тялото и определя сумарното енергийно съдържание на тялото.

Вътрешната енергия в термодинамиката се означава с U (u) и обикновено се изразява не в абсолютни единици, а само като изменение в даден процес. Поради тази причина не е от съществено значение как се задава скалата за измерване. Обикновено се приема за начало на отчитане на вътрешната енергия термодинамичното състояние с налягане 1 физическа атмосфера (760 мм ж.ст) и температура $T = 0^\circ\text{C}$.

3.5. Аналитичен израз на първия принцип на термодинамиката

За извеждане на първия принцип на термодинамиката се използва следната теоретична постановка (фиг. 3.2). В цилиндър с газ се движи бутало, което създава затворено пространство. Газът в затвореното пространство е подложен на постоянно налягане от товар с тегло K , който действа върху буталото. Тъй като товара е постоянен, силата с

която газа противодейства на теглото също е постоянна. При неизменна площ на буталото тази сила се осигурява от постоянното налягане на газа върху челото на буталото. Към газа се подава топлинна енергия Q през дъното на цилиндъра. Тази топлина се изразходва за повишаване на вътрешната енергия на газа и за извършване на работа при преместване на буталото. Законът за запазване на енергията в този случай се записва по следния начин:



Фиг.3.2 Първи принцип на термодинамиката

$$Q = U_2 - U_1 + L \quad [\text{J}] \quad (3.3)$$

където U_2 и U_1 са стойностите на вътрешната енергия в крайното и началното състояние, Q - внесената или отнета топлинна енергия и L - извършената работа. Ако се раздели горното равенство почленно на масата на газа се получава уравнението за запазване на енергията за единица маса (специфична енергия):

$$q = u_2 - u_1 + l \quad [\text{J/kg}] \quad (3.4)$$

Ако внесеното (отнето) количество топлина е безкрайно малко горното енергийно равенство може да се запише в диференциална форма:

$$dQ = dU + dL \quad \text{или} \quad dq = du + dl \quad (3.5)$$

Извършената работа може да се изрази по следния начин:

$$L = \vec{F} \cdot \vec{s} ,$$

където \vec{F} е силата действаща върху буталото и \vec{s} – преместване на буталото.

От своя страна силата може да се представи с помощта на налягането p и площта на челната повърхнина на буталото A :

$$\vec{F} = p A , \quad \text{или за работата се получава:}$$

$$L = p \cdot A \cdot s$$

Като се вземе пред вид, че произведението на площта на буталото по преместването е равно на изменението на обема на газа $V_2 - V_1 = A \cdot s$, за извършената работа се получава:

$$L = p \cdot (V_2 - V_1) \quad \text{или в диференциална форма} \quad dL = p dV$$

Когато налягането в процеса не остава постоянно, работа може да се определи от израза:

$$L_{12} = \int_1^2 p \cdot dV$$

Уравнението за запазване на енергията приема вида:

$$dQ = dU + p \cdot dV \quad (3.6)$$

и за единица маса от газа:

$$dq = du + p dv \quad (3.7)$$

Това уравнение представлява математичен запис на **първия принцип** на термодинамиката.

В интегрална форма това уравнение има вида:

$$Q_{12} = U_2 - U_1 + p (V_2 - V_1) \quad (3.8)$$

$$q_{12} = u_2 - u_1 + p (v_2 - v_1)$$

Това е първи запис на първия принцип на термодинамиката.

Уравнението може да бъде записано в още една форма. За целта се извършват следните преобразувания:

$$dq = du + p dv + v \cdot dp - v \cdot dp \quad (3.9)$$

$$dq = du + d(pv) - v \cdot dp \quad \text{или} \quad dq = d(u + pv) - v \cdot dp$$

Ако се положи $i = u + p \cdot v$, където i е означена величина, която се нарича **енталпия**, то горното уравнение приема вида:

$$dq = di - v dp. \quad (3.10)$$

Ако умножим почленно с масата m се получава равенство за цялата маса на газа:

$$dQ = dI - V dp \quad (3.11)$$

Това е втори запис на първия принцип на термодинамиката.

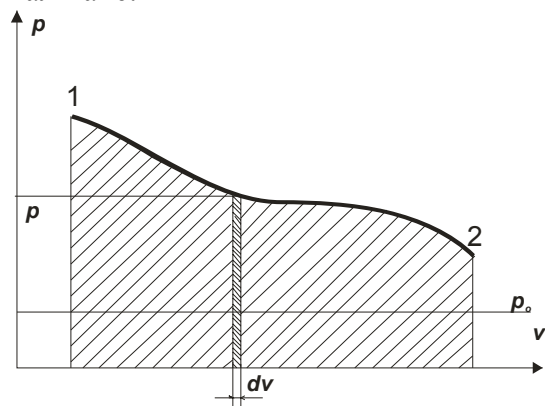
В интегрална форма този запис има вида:

$$Q_{12} = I_2 - I_1 - V(p_2 - p_1) \quad (3.12)$$

$$q_{12} = u_2 - u_1 + v(p_2 - p_1) \quad (3.13)$$

3.6. Работа в термодинамиката. Работна (p-v) диаграма

Работата в техническата термодинамика бива няколко вида: абсолютна, полезна, многократно спечелена (техническа) работа. Дефинираната по горе работа се нарича абсолютна работа, защото в израза за нейното определяне присъства абсолютното налягане:



Фиг.3.3 p-v диаграма

$$L_{12} \cdot = \int_1^2 p \cdot dV \quad \text{и} \quad l_{12} \cdot = \int_1^2 p \cdot dv \quad [\text{J/kg}]$$

Термодинамичните процеси могат да се представят графично в различни координатни системи. Най-често се използва координатна система в която по абсисната ос се нанася специфичния обем, а по ординатната – налягането. На фиг.3.3 е показан термодинамичен процес 1-2 в p-v диаграма. На нея е отбелязан безкрайно малък участък за изменение на специфичния обем dv .

Заштрихованата област включваща този участък

има площ: $p \cdot dv$. По този начин се записва и елементарната работа $dI = p \cdot dv$. Следователно, елементарната площ от диаграмата образувана при безкрайно малко изменение на обема е пропорционална на елементарната работа извършваща се при това изменение на обема. Ако се извърши интегриране на елементарната работа ще се получи пълната абсолютна работа в процес 1-2:

$$l_{12} \cdot = \int_1^2 p \cdot dv.$$

Графически това съответства на сумиране по всички елементарни участъци dv между началното и крайно състояние на процеса. Това означава, че площта заключена между кривата на процеса 1-2 и абсисната ос (заштрихованата площ) в определен мащаб представя абсолютната работа. Затова p-v диаграмата се нарича още работна диаграма.

В термодинамиката атмосферното налягане играе важна роля. На фиг.3.3 то е означено с p_0 . Това налягане действа навсякъде. Ако разглеждаме цилиндър с бутало, върху което действа работно тяло (газ), то върху противоположната страна на буталото действа атмосферното налягане (противодействие). Следователно, не може да се оползотвори като работа цялата стойност на налягането на газа, а само стойността над атмосферното налягане. На горната графика, работата която би могла да се използва е пропорционална на площта между кривата на процеса и линията на атмосферното налягане. Тази работа се нарича **полезна работа**.

Друг проблем при извършване на работа в термодинамичните процеси е възможността за използване на тази работа в реални технически устройства. За да може да се извършва това е необходимо да се осигурят условия за връщане на системата в изходно състояние след протичане на термодинамичен процес, т.е възможност за многократно (циклично) протичане на процесите. Обикновено, за връщане на системата в изходно състояние се изразходва част от спечелената работа. Тогава разполагаемата работа е по-малка от полезната работа. Тази работа се нарича многократно спечелена или **техническа работа**. Техническата работа се определя като разлика от работата на термодинамичния процес и работата за процесът, който връща системата в изходно състояние.

4. Специфичен топлинен капацитет

В калориметричното уравнение за топлинната енергия е въведен коефициент c , който се нарича специфичен топлинен капацитет. Това е материална константа, която определя количеството топлина което трябва да погълне или отдаде 1 кг от дадено вещество за да се измени температурата му с 1 °K. Той може да се определи от калориметричното уравнение:

$$c = \frac{dQ}{m \cdot dT} = \frac{dq}{dT} \quad (4.1)$$

Измерителната единица на специфичния топлинен капацитет е [J/kg K]

4.1 Видове специфичен топлинен капацитет

В зависимост от начина на задаване на количеството вещество, специфичният топлинен капацитет бива:

- масов специфичен топлинен капацитет. Означава се с c и има измерителна единица [J/kg K];

- обемен специфичен топлинен капацитет. Означава се с C и има измерителна единица [J/m³ K];

- молен специфичен топлинен капацитет. Означава се с c_M и има измерителна единица [J/mol K].

Между отделните видове специфичен топлинен капацитет съществуват връзки, които се определят от връзките между единиците за измерване на количеството вещество:

$$c = \frac{c_M}{M} \quad c_M = c \cdot M; \quad C = \rho \cdot c \quad (4.2)$$

При газовете специфичният топлинен капацитет зависи от типа на термодинамичния процес, при който става обмяна на топлинна енергия. Затова при газовете са дефинирани специфичен топлинен капацитет при постоянно налягане и специфичен топлинен капацитет при постоянен обем. Те могат да бъдат определяни чрез различни измерителни единици за количество вещество и биват масов, обемен и молен специфичен обем при постоянно налягане или при постоянен обем.

4.2. Специфичен топлинен капацитет при постоянно налягане

Това е специфичен топлинен капацитет на газове в процеси с постоянно налягане. Записват се с индекс p : c_p , C_p , c_{Mp} . Специфичният топлинен капацитет при постоянно налягане се определя от основното калориметрично уравнение:

$$c_p = \left(\frac{dq}{dT} \right)_{p=const} \quad (4.4)$$

От първия принцип на термодинамиката, като се използва вторият запис за топлината: $dq = di - v dp$ за специфичния топлинен капацитет при постоянно налягане се получава:

$$c_p = \frac{dq}{dT} = \frac{di - v \cdot dp}{dT}$$

Тъй като се разглежда процес при който налягането е постоянно $p = const$, то $dp = 0$ и за специфичния топлинен капацитет се получава:

$$c_p = \frac{di}{dT}, \quad (4.5)$$

т.е специфичният топлинен капацитет е производна на енталпията по отношение изменението на температурата.

Енталпията може да бъде определена от горния израз:

$$di = c_p \cdot dT. \quad (4.6)$$

След интегриране на този израз се получава:

$$\Delta i = i_2 - i_1 = c_p (T_2 - T_1) \quad (4.7)$$

За цялата маса на термодинамичната система този израз има вида:

$$\Delta I = I_2 - I_1 = c_p m(T_2 - T_1) \quad (4.8)$$

4.3. Специфичен топлинен капацитет при постоянен обем

Това е специфичен топлинен капацитет на газове в термодинамични процеси със запазване на постоянен обем. Записва се с индекс v : c_v , C_v , c_{Mv} . Специфичният топлинен капацитет при постоянен обем се определя от основното калориметрично уравнение:

$$c_v = \left(\frac{dq}{dT} \right)_{v=const} \quad (4.9)$$

От първия принцип на термодинамиката, като се използва първия запис за топлината:

$dq = du + p \cdot dv$ за специфичния топлинен капацитет при постоянен обем се получава:

$$c_v = \frac{dq}{dT} = \frac{du + p \cdot dv}{dT}$$

Тъй като се разглежда процес при който обемът е постоянен $v = const$, то $dv = 0$ и за специфичния топлинен капацитет се получава:

$$c_v = \frac{du}{dT}, \quad (4.10)$$

т.е специфичният топлинен капацитет е производна на вътрешната енергия по отношение изменението на температурата.

Вътрешната енергия може да бъде определена от горния израз:

$$du = c_v \cdot dT. \quad (4.11)$$

След интегриране на този израз се получава:

$$\Delta u = u_2 - u_1 = c_v (T_2 - T_1) \quad (4.12)$$

За цялата маса на термодинамичната система този израз има вида:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = c_v m(T_2 - T_1) \quad (4.13)$$

4.4. Връзка между специфичният топлинен капацитет при постоянно налягане и при постоянен обем

Между двете стойности на топлинния капацитет c_v и c_p съществува връзка, която е много важна за термодинамичните процеси. Тази връзка може да се установи като се използва първия принцип на термодинамиката и основното уравнение за състояние на газовете.

Специфичният топлинен капацитет се определя от равенството $c = \left(\frac{dq}{dT} \right)$. Ако

изменението на топлината се зададе посредством първия запис на първия принцип на термодинамиката се получава:

$$c = \frac{du + pdv}{dT} = \frac{du}{dT} + \frac{pdv}{dT}$$

Ако за това равенство се приеме че налягането остава постоянно, то в лявата част вместо c ще трябва да се запише c_p .

$$c_p = \frac{du}{dT} + \frac{pdv}{dT}.$$

Специфичният обем при постоянно налягане е $c_v = \frac{du}{dT}$ и за горното равенство се

получава:

$$c_p = c_v + \frac{pdv}{dT}$$

При $p = \text{const}$ от уравнението за състояние на газовете в диференциална форма се получава ($dp=0$):

$$p \, dv = R \, dT$$

и за специфичния топлинен капацитет при постоянно налягане се получава:

$$c_p = c_v + \frac{RdT}{dT} = R \quad \text{или окончателно} \quad \boxed{c_p = c_v + R} \quad (4.14)$$

Аналогичен резултат може да се получи ако топлинната енергия се представи чрез втория запис на първия принцип на термодинамиката и се извършат същите преобразования.

Тогава се получава: $c_v = c_p - R$

4.5. Друга съществена връзка между c_p и c_v

Съществува още една връзка между специфичните топлинни капацитети при постоянно налягане и постоянен обем. Тя се основава на дефиницията за така наречения **показател на адиабатата χ** :

$$\chi = \frac{c_p}{c_v} \quad \text{или} \quad c_p = \chi c_v \quad \text{или} \quad c_v = \frac{c_p}{\chi}$$

Използвайки връзката $c_p = c_v + R$ могат да се получат изрази за специфичните топлинни капацитети при постоянно налягане и постоянен обем представени чрез газовата константа и показателя на адиабатата:

$$\boxed{c_p = \chi \frac{R}{\chi - 1}} \quad \text{и} \quad \boxed{c_v = \frac{R}{\chi - 1}} \quad (4.15)$$

4.6. Специфичен топлинен капацитет на газови смеси

Ако разгледаме газова смес на n компоненти с маси: $m_1, m_2, m_3 \dots m_n$ и специфични топлинни капацитети $c_1, c_2, c_3 \dots c_n$ и към газовата смес се внесе (отнеме) топлинна енергия Q , тя може да се изрази във вида:

$$Q = m_{см} c_{см} (T_2 - T_1) = (m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_n c_n) (T_2 - T_1)$$

След разделяне на температурната разлика и масата на сместа се получава:

$$c_{см} = \frac{m_1}{m_{см}} + \frac{m_2}{m_{см}} + \dots \quad \text{или} \quad c_{см} = g_1 c_1 + g_2 c_2 + \dots$$

Тогава специфичният топлинен капацитет на газовата смес може да се запише във вида:

$$c_{см} = \sum_{i=1}^n g_i c_i \quad (4.16)$$

По аналогичен начин може да определи специфичния топлинен капацитет на сместа, ако е зададена с компоненти в обемни дялове:

$$C_{см} = \sum_{i=1}^n r_i C_i, \quad (4.17)$$

където $C_{см}$ и C_i са обемни топлинни капацитети на сместа и компонентите.