

Hessův zákon (pro slučovací entalpie): $\Delta_r H_m^\ominus = \sum_{i=1}^k \nu_i \Delta_{sl} H_{mi}^\ominus$

1. Převod elektrické energie na tepelnou

Varná konvice má příkon 1700 W. Za jak dlouho se přivede k varu litr vody z vodovodní teploty 15 °C? Tepelná kapacita vody je 4.2 J K⁻¹ g⁻¹.

⌘⌘ ⑆⑆

$$R=8.314 = \mathbf{8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}}$$

$$DT=100-15 = \mathbf{85 \text{ K}}$$

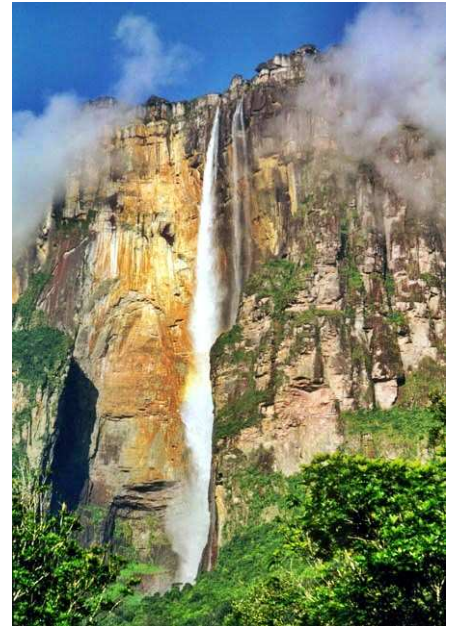
$$C_{sp}=4.2 = \mathbf{4.2 \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1}}$$

$$m=1000 = \mathbf{1000 \text{ g}}$$

$$Q=C_{sp} \cdot DT \cdot m = \mathbf{3.57e+05 \text{ J}}$$

$$t=Q/1700 = \mathbf{210 \text{ s}}$$

$$t/60 = \mathbf{3.5 \text{ min}}$$



2. +Převod mechanické energie na tepelnou

Nejvyšší vodopád světa, Salto Angel ve Venezuele, je vysoký 979 m. O kolik se voda pádem ohřeje?

⌘ ⑆⑆

$$h=979 = \mathbf{979 \text{ m}}$$

$$g=9.81 = \mathbf{9.81 \text{ m s}^{-2}}$$

$$E=h \cdot g = \mathbf{9604 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} = \mathbf{J \text{ kg}^{-1}}$$
 na 1 kg vody

$$C_{sp}=4.2e3 = \mathbf{4200 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}}$$
 na 1 kg vody

$$DT=E/C_{sp} = \mathbf{2.287 \text{ K}}$$

3. Kalorimetrická rovnice

Kolik ledu o teplotě -20 °C musíme vhodit do půl litru čaje o teplotě 100 °C, aby se čaj dal pít (teplota 50 °C)? Specifická tepelná kapacita ledu je 2.05 J K⁻¹ g⁻¹, specifická entalpie tání (skupenské teplo tání) ledu je 334 J g⁻¹.

⑆ 08⌘

$$Q=-500 \cdot 50 \cdot 4.2 = \mathbf{-1.05e+05 \text{ J}}$$
 teplo na ochlazení čaje

$$q_1=20 \cdot 2.05 = \mathbf{41 \text{ J}}$$
 ohřátí 1 g ledu na 0 °C

$$q_2=334 = \mathbf{334 \text{ J}}$$
 roztátí 1 g ledu

$$q_3=50 \cdot 4.2 = \mathbf{210 \text{ J}}$$
 ohřátí 1 g vody na 50 °C

kalorimetrická rovnice:

$$m=-Q/(q_1+q_2+q_3) = \mathbf{179.5 \text{ g}}$$

4. Kalorimetrie, přepočítání U a H

Vzorek kapalného acetonu (M = 58,08 g/mol) vážící 0,586 g byl spálen v kalorimetrické bombě. Tepelná kapacita kalorimetrické bomby včetně vzorku činila 5640 J/K. Při pokusu bylo zaznamenáno zvýšení teploty z 22,87 °C na 24,56 °C. Určete standardní spalnou vnitřní energii a entalpii.

$$\Delta U^{\text{sp}} = -945 \text{ kJ mol}^{-1}, \Delta H^{\text{sp}} = -947 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$m=0.586 = \mathbf{0.586 \text{ g}}$$

$$M=58.08 = \mathbf{58.08 \text{ g mol}^{-1}}$$

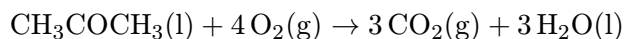
$$C=5640 = \mathbf{5640 \text{ J K}^{-1}}$$

$$dt=24.56-22.87 = \mathbf{1.69 \text{ K}}$$

$$Q=-C \cdot dt = \mathbf{-9532 \text{ J}}$$

$$n=m/M = \mathbf{0.01009 \text{ mol}}$$

$$DU_m=Q/n = \mathbf{-9.447e+05 \text{ J mol}^{-1}}$$



$$dn = -1 = -1$$

$$T = 298.15 = 298.1 \text{ K}$$

$$DH_m = DUm + dn \cdot R \cdot T = -9.472e+05 \text{ J mol}^{-1}$$

$$DH_m/1000 = -947.2 \text{ kJ mol}^{-1}$$

5. Hessův zákon, výhřevnost

Vypočtete spalné teplo (za konstantního tlaku) a výhřevnost methanu¹. Odhadněte teoretickou maximální účinnost kondenzačního kotle na zemní plyn (přibližně methan) – účinnost je definována jako poměr tepla předaného otopnému médiu k výhřevnosti paliva.

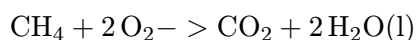
Standardní slučovací enthalpie látek při 25 °C jsou: $\Delta_{\text{sl}}H_m^\ominus(\text{CO}_2(\text{g})) = -393,51 \text{ kJ/mol}$

$$\Delta_{\text{sl}}H_m^\ominus(\text{H}_2\text{O}(\text{l})) = -285,84 \text{ kJ/mol}$$

$$\Delta_{\text{sl}}H_m^\ominus(\text{CH}_4(\text{g})) = -74,69 \text{ kJ/mol}$$

Standardní výparná entalpie vody ($\text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g})$) při 25 °C je $\Delta_{\text{vyp}}H_m^\ominus = 44,03 \text{ kJ/mol}$.

$$\eta_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{předaný}}}{Q_{\text{výhřevnost}}} = \frac{890,50 \text{ kJ/mol}}{947,20 \text{ kJ/mol}} = 0,94$$



$$DH_{\text{sp}} = -393,51 - 2 \cdot 285,84 - (-74,69) = -890,5 \text{ kJ mol}^{-1} \quad \text{H}_2\text{O}(\text{l}) \rightarrow \text{H}_2\text{O}(\text{g}) \text{ přičteme } 2x$$

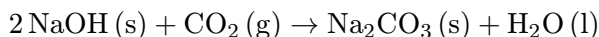
$$DH_{\text{vyh}} = DH_{\text{sp}} + 2 \cdot 44,3 = -801,9 \text{ kJ mol}^{-1}$$

$$\text{vyhřevnost} = -DH_{\text{vyh}} = 801,9 \text{ kJ mol}^{-1}$$

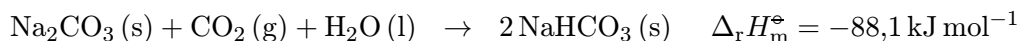
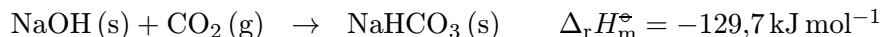
$$\text{max. účinnost} = DH_{\text{sp}} / DH_{\text{vyh}} = 1,11$$

6. Hessův zákon, lineární kombinace

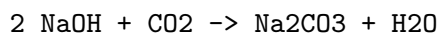
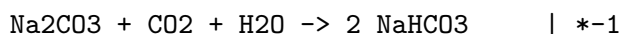
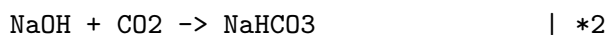
Vypočtete $\Delta_r H_m^\ominus$ pro reakci ($T = 298,15 \text{ K}$)



Z následujících údajů



$$\Delta_r H_m^\ominus = \Delta_r H_m^\ominus(\text{NaHCO}_3) - \Delta_r H_m^\ominus(\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$$



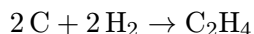
$$DH = -129,7 \cdot 2 + (-1) \cdot (-88,1) = -171,3 \text{ kJ mol}^{-1}$$

7. Hessův zákon – spalné enthalpie

Vypočtete standardní slučovací enthalpii ethylenu na základě následujících standardních spalných enthalpií:

látka	$\text{C}_2\text{H}_4(\text{g})$	$\text{H}_2(\text{g})$	$\text{C}(\text{s})$
$\Delta_{\text{sp}}H_m^\ominus / (\text{kJ mol}^{-1})$	-1411,0	-285,8	-393,5

$$\eta_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{předaný}}}{Q_{\text{výhřevnost}}} = \frac{52,4 \text{ kJ/mol}}{1411,0 \text{ kJ/mol}} = 0,037$$



$$DH_{\text{sl}} = 2 \cdot (-393,5) + 2 \cdot (-285,8) - (-1411,0) = 52,4 \text{ kJ mol}^{-1}$$

¹Spalné teplo je definováno jako spalná entalpie, voda je uvažována, podobně jako je tomu v kalorimetru, v kapalně fázi; výhřevnost je až na znaménko spalná entalpie s tím, že vzniká vodní pára.

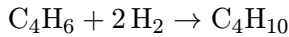
$$\text{Kirchhoffova v\u011bta: } \Delta_r H_m^\ominus(T) = \Delta_r H_m^\ominus(T_0) + \int_{T_0}^T \Delta_r C_{pm}^\ominus(T) dT$$

8. Kirchhoffova v\u011bta

Vypo\u010dt\u00e9te standardn\u00ed reak\u010dn\u00ed entalpii hydrogenace 1,3-butadienu (g) na butan (g) p\u0159i 200 °C. Data:

l\u00e1tk\u00e1	$\Delta_{sl}H_m^\ominus(298\text{ K})/(\text{kJ mol}^{-1})$	$\bar{C}_{pm}/(\text{J K}^{-1}\text{ mol}^{-1})$
1,3-butadien	110	119
butan	-126	95
vod\u00edk	0	29

-1000 1000 2000



$$\text{DH}_{298} = (-126 - 110) \cdot 1e3 = -2.36e+05 \text{ J mol}^{-1}$$

$$\text{DC}_{pm} = 95 - 119 - 2 \cdot 29 = -82 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

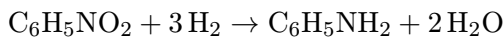
$$\text{DH} = \text{DH}_{298} + (200 - 25) \cdot \text{DC}_{pm} = -2.504e+05 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

9. +Kirchhoffova v\u011bta

P\u0159i synt\u00e9ze anilinu hydrogenac\u00ed 1 kg nitrobenzenu se stechiometrick\u00fdm mno\u017estv\u00edm vod\u00edku za teploty 250 °C se uvolnilo 2,8 MJ tepla. Vypo\u010dt\u00e9te, z kolika procent reakce prob\u011bhla. Data:

L\u00e1tk\u00e1	$\Delta_{sl}H_m^\ominus(298\text{ K})/(\text{kJ mol}^{-1})$	$C_{pm}^\ominus/(\text{J K}^{-1}\text{ mol}^{-1})$
H ₂ (g)	0	28
H ₂ O (g)	-242	33
nitrobenzen (g)	55	110
anilin (g)	101	102

% 84



$$n = 1000 / M(\text{C}_6\text{H}_5\text{NO}_2) = 8.123 \text{ mol}$$

$$Q = -2.8e6 = -2.8e+06 \text{ J}$$

$$\text{DH}_{\text{skut}} = Q/n = -3.447e+05 \text{ J mol}^{-1}$$

$$\text{DH}_{298} = 101e3 + 2 \cdot (-242e3) - 55e3 = -4.38e+05 \text{ J mol}^{-1}$$

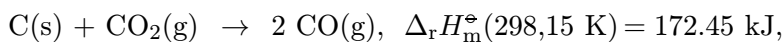
$$\text{DC}_p = 102 + 2 \cdot 33 - 110 - 3 \cdot 28 = -26 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{DH}_{\text{teor}} = \text{DH}_{298} + \text{DC}_p \cdot (250 - 25) = -4.438e+05 \text{ J mol}^{-1}$$

$$\text{proc} = 100 \cdot \text{DH}_{\text{skut}} / \text{DH}_{\text{teor}} = 77.66 \%$$

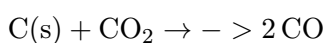
10. +Kirchhoffova v\u011bta

Oxid uhelnat\u00fd se vyr\u00e1b\u00ed p\u0159eh\u00e1n\u011bn\u00edm sm\u011b\u0161i CO₂ a O₂ p\u0159es roz\u017e\u011baven\u00fd uhl\u00edk za norm\u00e1ln\u00edho tlaku. Prob\u00edh\u00e1j\u00ed sou\u010dasn\u011b tyto reakce:



p\u0159\u00edcemu\u017e reaktanty maj\u00ed teplotu 1200 K. Ur\u010dete pom\u011br l\u00e1tkov\u00e9ho mno\u017estv\u00ed O₂:CO₂, aby \u00farhrnn\u00e9 reak\u010dn\u00ed teplo bylo nulov\u00e9. St\u0159edn\u00ed tepeln\u00e9 kapacity odhadn\u00e9te z grafu.

$$8.87 \cdot 0 = 0.02 \cdot \text{CO}_2 + 0.18 \cdot \text{O}_2 + 0.82 \cdot \text{CO} + 0.367 \cdot \text{CO}_2 + 0.633 \cdot \text{O}_2 + 1.167 \cdot \text{CO} + 1.8 \cdot \text{C}$$



$$\text{DH}_{1T298} = 172.45e3 = 1.724e+05 \text{ J mol}^{-1} \quad 2\text{C(s)} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$$

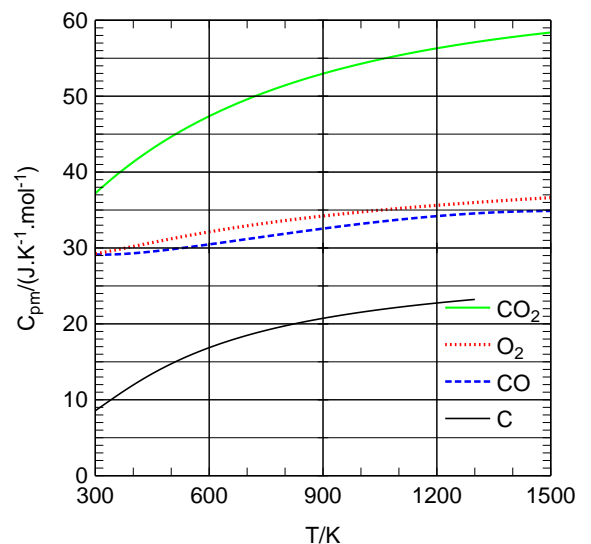
$$\text{DH}_{2T298} = -111.53e3 \cdot 2 = -2.231e+05 \text{ J mol}^{-1}$$

$$\text{C}_p\text{CO}_2 = 49.31 = 49.31 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

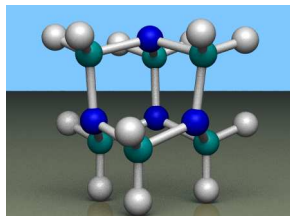
$$\text{C}_p\text{O}_2 = 32.96 = 32.96 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{C}_p\text{CO} = 31.52 = 31.52 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$

$$\text{C}_p\text{C} = 18.00 = 18 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$$



$$\begin{aligned} DCp1 &= 2 \cdot CpCO - CpC - CpCO2 = -4.27 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \\ DH1 &= DH1T298 + (1200 - 298) \cdot DCp1 = 1.686e+05 \text{ J mol}^{-1} \\ DCp2 &= 2 \cdot CpCO - 2 \cdot CpC - CpO2 = -5.92 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1} \\ DH2 &= DH2T298 + (1200 - 298) \cdot DCp2 = -2.284e+05 \text{ J mol}^{-1} \\ pomer &= (-DH1)/DH2 = 0.7382 \text{ poměr O}_2\text{:CO}_2 \end{aligned}$$



11. +Spalná entalpie

Kolik vody ohřejete k varu (z 20 °C) jednou kostkou suchého lihu (hexamethylenetetramin, C₆H₁₂N₄) o hmotnosti 5 g? Ztráty (zahrnující i to, že zplodiny reakce vč. nadbytku vzduchu mají vyšší teplotu než 25 °C) činí asi 30 %. Data (25 °C): $\Delta_{sp}H^\ominus(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4) = -4200 \text{ kJ mol}^{-1}$, $\Delta_{vyp}(\text{H}_2\text{O}) = 44 \text{ kJ mol}^{-1}$. $C_{psp}(\text{H}_2\text{O}) = 4,2 \text{ J g}^{-1} \text{ K}^{-1}$

εαρ ε οκρs

$$\begin{aligned} \text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4 + 9 \text{O}_2 &\rightarrow 6 \text{CO}_2 + 6 \text{H}_2\text{O(l)} + 2 \text{N}_2 \\ DspH20l &= -4200 = -4200 \text{ kJ mol}^{-1} \\ DspH20g &= -4200 + 6 \cdot 44 = -3936 \text{ kJ mol}^{-1} \\ Dspsp &= DspH20g / M(\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4) = -28.08 \text{ kJ g}^{-1} \\ m &= 5 = 5 \text{ g} \\ Q &= -0.7 \cdot m \cdot Dspsp \cdot 1000 = 9.827e+04 \text{ J} \\ Csp &= 4.2 = 4.2 \text{ J K}^{-1} \text{ g}^{-1} \\ dt &= 100 - 20 = 80 \text{ K} \\ mvoda &= Q / 4.2 / dt = 292.5 \text{ g} \end{aligned}$$

12. +Hess – směs

Svítiplyn obsahuje 50 % vodíku, 20 % methanu, 10 % oxidu uhelnatého a zbytek jsou inertní (oxid uhličitý, dusík aj.). Vypočítejte výhřevnost svítiplynu v jednotkách MJ m⁻³ (objem se měří za normálních podmínek, tj. teploty 273.15 K a tlaku 101.325 kPa, výhřevnost za teploty 298 K).

ε-αρ ε οκρs

látka	$\Delta_{sl}H_m^\ominus(298 \text{ K})/\text{kJ mol}^{-1}$
H ₂ O (g)	-242
CO (g)	-110
CO ₂ (g)	-394
CH ₄ (g)	-75

$$\begin{aligned} DspHH2 &= -242 = -242 \text{ kJ mol}^{-1} \\ DspHCH4 &= 2 \cdot -242 + -394 - -75 = -803 \text{ kJ mol}^{-1} \\ DspHCO &= -394 - -110 = -284 \text{ kJ mol}^{-1} \\ DH &= 0.50 \cdot DspHH2 + 0.20 \cdot DspHCH4 + 0.10 \cdot DspHCO = -310 \text{ kJ mol}^{-1} \\ n &= 101325 / R / 273.15 = 44.62 \text{ mol m}^{-3} \\ Qvyh &= -DH \cdot n = 1.383e+04 \text{ kJ m}^{-3} \\ Qvyh / 1000 &= 13.83 \text{ MJ mol}^{-1} \end{aligned}$$