

Masarykova univerzita v Brně
Pedagogická fakulta

Řešené příklady z fyzikální chemie II

Základy termodynamiky
Termodynamika chemických reakcí

Hana Cídllová, Natálie Musilová

Brno 2003

Copyright © Hana Cídllová, Natálie Musilová 2003
ISBN

OBSAH

PŘEDMLUVA	3
ZÁKLADY TERMODYNAMIKY.....	4
<i>PRVNÍ VĚTA TERMODYNAMICKÁ</i>	<i>4</i>
Potřebné vztahy	4
Řešené příklady	6
<i>GIBBSOVA ENERGIE.....</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
Potřebné vztahy	Chyba! Záložka není definována.
Řešené příklady	Chyba! Záložka není definována.
<i>TERMOCHEMICKÉ ZÁKONY.....</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
Potřebné vztahy	Chyba! Záložka není definována.
Řešené příklady	Chyba! Záložka není definována.
<i>ENTROPIE.....</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
Potřebné vztahy	Chyba! Záložka není definována.
Řešené příklady	Chyba! Záložka není definována.
<i>HELMHOLTZOVA ENERGIE.....</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
Potřebné vztahy	Chyba! Záložka není definována.
Řešené příklady	Chyba! Záložka není definována.
<i>KIRCHHOFFOVA ROVNICE.....</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
Potřebné vztahy	Chyba! Záložka není definována.
Řešené příklady	Chyba! Záložka není definována.
<i>PŘÍKLADY K SAMOSTATNÉMU ŘEŠENÍ.....</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
TERMODYNAMIKA CHEMICKÝCH REAKCÍ.....	Chyba! Záložka není definována.
<i>USKUTEČNITELNOST CHEMICKÝCH REAKCÍ.....</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
Potřebné vztahy	Chyba! Záložka není definována.
Řešené příklady	Chyba! Záložka není definována.
<i>ROVNOVÁŽNÉ KONSTANTY</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
Potřebné vztahy	Chyba! Záložka není definována.
Řešené příklady	Chyba! Záložka není definována.
Rovnovážná konstanta K_a	Chyba! Záložka není definována.
Rovnovážná konstanta K_p	Chyba! Záložka není definována.
Rovnovážná konstanta K_c	Chyba! Záložka není definována.
Rovnovážná konstanta K_x	Chyba! Záložka není definována.
Složení reakční směsi	Chyba! Záložka není definována.
Vliv teploty na chemickou rovnováhu	Chyba! Záložka není definována.
Chemická rovnováha v heterogenní soustavě	Chyba! Záložka není definována.
<i>AFINITA CHEMICKÉ REAKCE.....</i>	<i>Chyba! Záložka není definována.</i>
Potřebné vztahy	Chyba! Záložka není definována.
Řešené příklady	Chyba! Záložka není definována.

PŘÍKLADY K SAMOSTATNÉMU ŘEŠENÍ..... Chyba! Záložka není definována.

PŘEDMLUVA

Skriptum je druhým dílem sbírky „Řešené příklady z fyzikální chemie I-VI“. Podobně jako první díl, i tento navazuje na skripta *L. Kišová, L. Trnková: Příklady fyzikální chemie, PřF MU, Brno 1991* a na databázi počítačového výukového programu CECAL, která je studentům učitelství chemie na Pedagogické fakultě Masarykovy university v Brně k dispozici.

Do skript je zařazena řada schémat, z nichž většina by měla studentům usnadnit úvahy související s aplikací termochemických zákonů. Organizace i formální stránka textu jsou stejné jako u prvního dílu. Pro úplnost je možno znova uvést stručný obsah jednotlivých dílů skript:

- **Řešené příklady z fyzikální chemie I**
 - Skupenské stavy
 - Fázové rovnováhy
- **Řešené příklady z fyzikální chemie II**
 - Základy termodynamiky
 - Termodynamika chemických reakcí
- **Řešené příklady z fyzikální chemie III**
 - Molekulární transport
 - Teorie reakční rychlosti
- **Řešené příklady z fyzikální chemie IV**
 - Chemická kinetika
 - Kinetika složitějších reakcí
- **Řešené příklady z fyzikální chemie V**
 - Roztoky elektrolytů
 - Galvanické články a elektrodové děje
- **Řešené příklady z fyzikální chemie VI**
 - Koloidní soustavy
 - Vybrané optické fyzikálně chemické metody

Sbírka „Řešené příklady z fyzikální chemie I-VI“ je určena nejen studentům chemie na Pedagogické fakultě v Brně, ale také pedagogům, nadaným studentům středních škol, studentům chemie na jiných fakultách či vysokých školách jako doplňující pomůcka ke studiu obecné nebo fyzikální chemie a také všem ostatním zájemcům o chemii.

Děkujeme všem, kdo jakkoli napomohli při tvorbě a recenzi tohoto studijního materiálu i těm, kteří svými radami a připomínkami přispějí k odstranění dosud přehlédnutých nedostatků v textu.

Brno, 2003

Autorky

ZÁKLADY TERMODYNAMIKY

PRVNÍ VĚTA TERMODYNAMICKÁ

Potřebné vztahy

První věta termodynamická:

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W, \quad (1)$$

kde

ΔU přírůstek vnitřní energie soustavy (J)

ΔQ teplo přijaté soustavou (J)

ΔW objemová práce soustavou přijatá (J)

Objemová práce vykonaná vnějšími silami:

$$dW = -pdV, \text{ resp. } W = -\int_{V_1}^{V_2} pdV \quad (2)$$

Izotermický děj: $dW = -dQ,$ (2a)

neboť podle (3a) je při izotermickém ději $dU = 0$ J.

Adiabatický děj: $dW = dU,$ (2b)

neboť $dQ = 0$ J.

Izochorický děj: $dW = 0$ J, (2c)

neboť $dW = -pdV$ a při izochorickém ději je $dV = 0$ m³.

Izobarický děj: $\Delta W = -p\Delta V,$ (2d)

kde

p tlak (Pa)

ΔV zvětšení objemu soustavy (m³)

Změna vnitřní energie soustavy (zvláštní případy):

Izotermický děj: Vnitřní energie se nemění, $dU = 0$ J, (3a)

neboť $dU = C_{m,V}dT$, při konstantní teplotě je $dT = 0 \Rightarrow dU = 0$ J.

Adiabatický děj: $dU = dW,$ (3b)

neboť $dQ = 0$ J.

Izochorický děj: $dU = dQ,$ (3c)

neboť $dW = -pdV$ a při izochorickém ději je $dV = 0$ m³.

Izobarický děj: $\Delta U = \Delta Q - p\Delta V.$ (3d)

Význam symbolů viz (2).

Molární tepelné kapacity:

$$C_{V,m} = \left(\frac{dQ_m}{dT}\right)_V = \left(\frac{dU_m}{dT}\right)_V, \quad (4a)$$

neboť při izochorickém ději je podle (3c) $dQ = dU$

$$C_{p,m} = \left(\frac{dQ_m}{dT}\right)_p = \left(\frac{dH_m}{dT}\right)_p, \text{ , neboť podle definice je } dQ_p = dH \quad (4b)$$

$C_{V,m}$ molární tepelná kapacita při konstantním objemu
 $C_{p,m}$ molární tepelná kapacita při konstantním tlaku
 dQ_m diferenciál tepla přijatého soustavou o látkovém množství 1 mol
 dU_m diferenciál zvýšení vnitřní energie soustavy o látkovém množství 1 mol
 dH_m diferenciál zvýšení enthalpie soustavy o látkovém množství 1 mol
 dT diferenciál zvýšení teploty soustavy
indexy v, p daná veličina je uvažována při konstantním objemu, resp. tlaku

Vztah mezi $C_{p,m}$ a $C_{v,m}$:

$$C_{p,m} - C_{v,m} = R, \quad (5)$$

kde

R plynová konstanta, $R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

Ostatní symboly viz (4a, 4b).

Stavová rovnice ideálního plynu:

$$pV = nRT, \quad (6)$$

kde

p tlak plynu (Pa)

V objem plynu (m^3)

n látkové množství plynu (mol)

R plynová konstanta, $R = 8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$

T termodynamická teplota (K)

Řešené příklady

1. **O kolik J vzroste vnitřní energie plynu, který přijme 160 J tepla a zvětší svůj objem o 700 cm³ při konstantním tlaku 1.26*10⁵ Pa?**

Řešení:

Dosadíme do první věty termodynamické (1):

$$\Delta U = \Delta Q + \Delta W$$

ΔW je objemová práce přijatá soustavou. Ta se (při konstantním tlaku) vypočte podle vztahu

$$W = -p\Delta V, \text{ kde}$$

$$\Delta V = V_2 - V_1, (V_1..počáteční objem, V_2..konečný objem).$$

Pozor, objem musíme dosadit v jednotkách m³, tlak dosazujeme v Pa.

Dosadíme číselně:

$$\Delta U = 160 \text{ J} + (-1.26 \cdot 10^5 \text{ Pa} \cdot 700 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3) = 71.8 \text{ J}$$

Vnitřní energie soustavy vzrostla o 71.8 J.

2. **Jakou práci (kJ) musíme vykonat při izotermní vratné kompresi 102 g dusíku z tlaku 101 kPa na tlak dvojnásobný, jestliže je teplota 25°C? Předpokládejte ideální chování dusíku. $A_r(\text{N}) = 14.007$.**

Řešení:

Objem dusíku vypočteme pomocí stavové rovnice ideálního plynu(6):

$$pV = nRT$$

Potřebné látkové množství si vypočteme ze známé hmotnosti a molární hmotnosti:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{102}{28.014} = 3.641 \text{ mol N}_2$$

Komprese probíhá z tlaku $p_1 = 101 \text{ kPa}$ na tlak dvojnásobný, tedy $p_2 = 202 \text{ kPa}$.

Ze stavové rovnice ideálního plynu vypočteme příslušné objemy V_1 a V_2 :

$$p_1 V_1 = nRT$$

$$V_1 = \frac{nRT}{p_1}$$

$$V_1 = \frac{3.641 * 8.314 * 298.15}{101} = 89.361 \text{ dm}^3$$

$$V_2 = \frac{nRT}{p_2}$$

$$V_2 = \frac{3.641 * 8.314 * 298.15}{202} = 44.681 \text{ dm}^3$$

Objemová práce vykonaná vnějšími silami:

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Dosazením za $p = \frac{nRT}{V}$ dostaneme:

$$W = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV$$

Další úpravou dostaneme:

$$W = -nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV$$

neboť n , R , T jsou konstanty (izotermický děj s konstantním látkovým množstvím plynu).

$$W = -nRT \ln\left(\frac{V_2}{V_1}\right)$$

$$W = - 3.6410 * 8.314 * 298.15 * \ln\left(\frac{44.681}{89.361}\right) = 6256 \text{ J} = 6.256 \text{ kJ}$$

Při izotermní vratné kompresi musí vnější síly vykonat práci 6.256 kJ.

3. Molární objem $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ při 100°C a tlaku 101.325 kPa je $18 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1}$. Za těchto podmínek je molární objem $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ $30 \text{ dm}^3 \text{ mol}^{-1}$ a molární výparné teplo vody $40.599 \text{ kJ mol}^{-1}$. Vypočítejte přírůstek vnitřní energie (J) při reverzibilní fázové přeměně 25.5 mol $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$ na $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ za těchto podmínek.

Řešení:

Jedná se o izobarický děj, platí vztah (3d):

$$\Delta U = \Delta Q - p\Delta V$$

Výpočet ΔQ :

ΔQ je teplo přijaté celou soustavou, tedy vodou o látkovém množství 25.5 mol . V zadání je molární výparné teplo $\Delta H_{\text{vyp,m}}$ vody při 100°C a 101.325 kPa , tedy teplo, které za těchto podmínek přijme 1 mol H_2O při vypaření. Pak:

$$\Delta Q = \Delta H_{\text{m,vyp}} * n = 40.599 * 25.5 = 1035.3 \text{ kJ} = 1.0353 * 10^6 \text{ J}$$

Výpočet tlaku:

Ze zadání víme, že $p = 101.325 \text{ kPa} = 101325 \text{ Pa}$

Výpočet ΔV :

ΔV ...zvětšení objemu soustavy

$$\Delta V = V_{\text{konečný}} - V_{\text{počáteční}}$$

V našem případě je $V_{\text{konečný}}$ roven objemu $\text{H}_2\text{O}(\text{g})$ a $V_{\text{počáteční}}$ je roven objemu $\text{H}_2\text{O}(\text{l})$.

V zadání jsou molární objemy, tedy objemy připadající na 1 mol :

$$V_{\text{m}}(\text{g}) = \frac{V(\text{g})}{n} = \frac{V_{\text{konečný}}}{n}$$

$$V_{\text{m}}(\text{l}) = \frac{V(\text{l})}{n} = \frac{V_{\text{počáteční}}}{n}$$

$$\text{Odtud } V_{\text{konečný}} = V_{\text{m}}(\text{g}) * n = 30 * 25.5 = 765 \text{ dm}^3 = 765 * 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$\text{Podobně } V_{\text{počáteční}} = V_{\text{m}}(\text{l}) * n = 18 * 25.5 = 459 \text{ cm}^3 = 459 * 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\text{Pak } \Delta V = (765 * 10^{-3} - 459 * 10^{-6}) \text{ m}^3 = 764.5 * 10^{-3} \text{ m}^3.$$

Výpočet ΔU :

Dosazením do vztahu (3d) získáme konečný výsledek:

$$\Delta U = 1.0353 \cdot 10^6 - 101325 \cdot 764.5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 9.5781 \cdot 10^5 \text{ J}$$

Vnitřní energie soustavy vzrostla o $9.5781 \cdot 10^5 \text{ J}$.

4. **Jeden mol kyslíku expanduje z objemu 15 dm^3 za teploty 25°C na objem 46 dm^3 při teplotě 50°C . Vypočítejte práci vykonanou vnějšími silami (J). Expanze byla provedena takto: plyn vratně izotermně expandoval na objem 46 dm^3 a pak byl při konstantním objemu zahřát na 50°C . Předpokládejte ideální chování plynu.**

Řešení:

Celý děj rozdělíme na dva dílčí děje:

- 1) izotermní expanze plynu na objem 46 dm^3 (příslušné veličiny jsou v textu značeny indexem <1>),
- 2) zahřátí plynu při konstantním objemu (izochorický děj) z teploty $T_1 = 298.15 \text{ K}$ na teplotu $T_2 = 323.15 \text{ K}$ (příslušné veličiny jsou v textu značeny indexem <2>).

Celková práce se vypočte:

$$\underline{W = W_1 + W_2}$$

kde

W_1 ...práce vykonaná vnějšími silami při izotermickém ději (dílčí děj č.1)

W_2 ...práce vykonaná vnějšími silami při izochorickém ději (dílčí děj č.2)

Výpočet W_1 :

Objemová práce vykonaná vnějšími silami při izotermickém ději se vypočte (2):

$$W_1 = - \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

Za tlak p dosadíme ze stavové rovnice ideálního plynu (6):

$$p = \frac{nRT}{V} \Rightarrow W_1 = - \int_{V_1}^{V_2} \frac{nRT}{V} dV = nRT \int_{V_1}^{V_2} \frac{1}{V} dV$$

Integrací dostaneme:

$$W_1 = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \tag{a}$$

Víme, že plyn izotermně expandoval při teplotě $T = 298.15 \text{ K}$ z objemu $V_1 = 15 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ na objem $V_2 = 46 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$. Látkové množství plynu

bylo $n = 1$ mol. Dosadíme do (a) :

$$W_1 = -1 * 8.314 * 298.15 * \ln \frac{46 * 10^{-3}}{15 * 10^{-3}} = -2777.7 \text{ J.}$$

Výpočet W_2 :

Podle (2c) je $W_2 = 0 \text{ J}$.

Nyní již můžeme vypočítat celkovou práci vykonanou vnějšími silami:

$$W = W_1 + W_2$$

$$W = (-2777.7) + 0 \text{ W} = -2777.7 \text{ J}$$

Vnější síly vykonaly celkovou objemovou práci -2777.7 J .

5. **Jeden mol kyslíku expanduje z objemu 9 dm^3 za teploty 25°C na objem 42 dm^3 při teplotě 35°C . Vypočítejte přírůstek vnitřní energie systému. Expanze byla provedena tak, že plyn vratně izotermně expandoval na objem 42 dm^3 a pak byl při konstantním objemu zahřát na 35°C . Předpokládejte ideální chování plynu.**
 $C_{m,p} = 25.72 + 12.98 * 10^{-3} T - 38.6 * 10^{-7} T^2 \text{ (JK}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{)}$.

Řešení:

Celý děj rozdělíme na dva dílčí děje:

- 1) izotermní expanze plynu na objem 42 dm^3 (příslušné veličiny jsou v textu značeny indexem <1>),
- 2) zahřátí plynu při konstantním objemu (izochorický děj) z teploty $T_1 = 298.15 \text{ K}$ na teplotu $T_2 = 323.15 \text{ K}$ (příslušné veličiny jsou v textu značeny indexem <2>).

Celkový přírůstek vnitřní energie se vypočte:

$$\underline{\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2},$$

kde

ΔU_1 ... zvýšení vnitřní energie soustavy při izotermickém ději (děj č.1)

ΔU_2 ... zvýšení vnitřní energie soustavy při izochorickém ději (děj č.2)

Výpočet ΔU_1 :

Při izotermickém ději se (3a) vnitřní energie nemění, proto $\underline{\Delta U_1 = 0 \text{ J}}$.

Výpočet ΔU_2 :

Podle (3c) je $\Delta U_2 = \Delta Q_2$.

Dále podle (4a) pro izochorický děj s 1 mol plynu platí:

$$\frac{dU_m}{dT} = C_{V,m} \Rightarrow dU = C_{m,v}dT,$$

kde

$C_{V,m}$ molární tepelná kapacita látky tvořící soustavu při konstantním objemu,

dU_m přírůstek vnitřní energie soustavy,

dT přírůstek teploty.

Odtud: $dU_2 = dQ_2 = C_{m,v}dT$

$$\Delta Q_2 = \int_{T_1}^{T_2} C_{m,v} dT \quad (a)$$

$C_{V,m}$ se vypočte ze známého $C_{p,m}$ pomocí (5):

$$C_{p,m} - C_{V,m} = 8.314 \Rightarrow C_{V,m} = C_{p,m} - 8.314$$

$$C_{V,m} = (25.72 + 12.98 \cdot 10^{-3}T - 38.6 \cdot 10^{-7}T^2) - 8.314 = 17.406 + 12.98 \cdot 10^{-3}T - 38.6 \cdot 10^{-7}T^2$$

Dosadíme do (a):

$$\Delta Q_2 = \int_{T_1}^{T_2} (17.406 + 12.98 \cdot 10^{-3}T - 38.6 \cdot 10^{-7}T^2) dT$$

Odtud:

$$\Delta Q_2 = \int_{T_1}^{T_2} 17.406 dT + \int_{T_1}^{T_2} (12.98 \cdot 10^{-3}T) dT + \int_{T_1}^{T_2} (-38.6 \cdot 10^{-7}T^2) dT$$

kde $T_1 = 298.15 \text{ K}$, $T_2 = 308.15 \text{ K}$

Integrací dostaneme: $\Delta Q_2 = 17.406 \cdot (308.15 - 298.15) +$

$$+ 12.98 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{308.15^2 - 298.15^2}{2} - 38.6 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{308.15^3 - 298.15^3}{3}$$

$$\Delta Q_2 = 174.06 + 39.349 - 3.5477 = 209.86 \text{ J} \Rightarrow \Delta U_2 = 209.86 \text{ J}$$

Nyní již můžeme vypočítat celkovou změnu vnitřní energie soustavy:

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = 0 + 209.86 = 209.86 \text{ J}$$

Vnitřní energie soustavy vzrostla o 209.86 J.

6. Jeden mol kyslíku expanduje z objemu 6 dm^3 za teploty 25°C na objem 56 dm^3 při teplotě 50°C . Vypočítejte teplo přijaté plynem (J). Expanze byla provedena: plyn vratně izotermně expandoval na objem 56 dm^3 , a pak byl při konstantním objemu zahřát na 50°C . Předpokládejte ideální chování plynu.
 $C_{m,p} = 25.72 + 12.98 \cdot 10^{-3}T - 38.6 \cdot 10^{-7}T^2 \text{ (JK}^{-1}\text{mol}^{-1}\text{)}$.

Řešení:

Celý děj rozdělíme na dva dílčí děje:

- 1) izotermní expanze plynu na objem 56 dm^3 (příslušné veličiny jsou v textu značeny indexem <1>),
- 2) zahřátí plynu při konstantním objemu (izochorický děj) z teploty $T_1 = 298.15 \text{ K}$ na teplotu $T_2 = 323.15 \text{ K}$ (příslušné veličiny jsou v textu značeny indexem <2>).

Celkové teplo přijaté plynem se vypočte:

$$dQ = dQ_1 + dQ_2, \quad (\text{a})$$

kde

dQ_1 ... teplo dodané soustavě při dílčím ději č.1

dQ_2 ... teplo dodané soustavě při dílčím ději č.2

Výpočet dQ_1 :

První věta termodynamická pro děj č. 1:

$$dU_1 = dQ_1 + dW_1,$$

kde

dU_1 ... přírůstek vnitřní energie soustavy při dílčím ději č.1

dQ_1 ... teplo dodané soustavě při dílčím ději č.1

dW_1 ... objemová práce vykonaná vnějšími silami při dílčím ději č.1

Podle (3a) je $dU = 0 \text{ J}$.

Odtud:

$$0 = dQ_1 + dW_1 \quad (\text{b})$$

Postupem stejným jako v příkladě č. 4 dojdeme ke vztahu:

$$W_1 = -nRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{c})$$

Víme, že 1 mol plynu izotermně expandoval při teplotě $T = 298.15 \text{ K}$ z objemu $V_1 = 6 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$ na objem $V_2 = 56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$.

Dosadíme do (c) :

$$W_1 = -1 * 8.314 * 298.15 * \ln \frac{56 * 10^{-3}}{6 * 10^{-3}} = -5536.7 \text{ J}$$

Dosadíme do vztahu (b):

$$0 = dQ_1 + dW_1 \Rightarrow 0 = dQ_1 - 5536.7 \Rightarrow dQ_1 = 5536.7 \text{ J}$$

Výpočet dQ₂:

$$dU_2 = dQ_2 + dW_2,$$

kde

dU₂... přírůstek vnitřní energie soustavy při dílčím ději č.2

dQ₂... teplo dodané soustavě při dílčím ději č.2

dW₂... objemová práce vykonaná vnějšími silami při dílčím ději č.2

Jelikož při izochorickém ději se objemová práce nekoná,
je dW₂ = 0 J a dU₂ = dQ₂, tedy dU₂ = dQ₂.

Dále podle (4a) pro izochorický děj s 1 mol plynu platí:

$$\left(\frac{dU_m}{dT}\right)_V = C_{V,m} \Rightarrow dU_m = C_{m,V}dT,$$

kde

C_{V,m} molární tepelná kapacita látky tvořící soustavu při konstantním objemu,

dU_m přírůstek vnitřní energie soustavy,

dT přírůstek teploty.

Odtud:

$$dU_2 = dQ_2 = C_{m,V}dT$$

$$\Delta Q_2 = \int_{T_1}^{T_2} C_{m,V} dT \quad (d)$$

C_{V,m} se vypočte ze známého C_{p,m} pomocí (5):

$$C_{p,m} - C_{V,m} = 8.314 \Rightarrow C_{V,m} = C_{p,m} - 8.314$$

$$C_{V,m} = (25.72 + 12.98 * 10^{-3}T - 38.6 * 10^{-7}T^2) - 8.314 = \\ = 17.406 + 12.98 * 10^{-3}T - 38.6 * 10^{-7}T^2$$

Dosadíme do (d):

$$\Delta Q_2 = \int_{T_1}^{T_2} (17.406 + 12.98 \cdot 10^{-3} T - 38.6 \cdot 10^{-7} T^2) dT$$

Odtud:

$$\Delta Q_2 = \int_{T_1}^{T_2} 17.406 dT + \int_{T_1}^{T_2} (12.98 \cdot 10^{-3} T) dT + \int_{T_1}^{T_2} (-38.6 \cdot 10^{-7} T^2) dT$$

kde $T_1 = 298.15 \text{ K}$, $T_2 = 323.15 \text{ K}$

Integrací dostaneme:

$$\begin{aligned} \Delta Q_2 = & 17.406 \cdot (323.15 - 298.15) + \\ & + 12.98 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{323.15^2 - 298.15^2}{2} - 38.6 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{323.15^3 - 298.15^3}{3} \end{aligned}$$

$$\Delta Q_2 = 435.15 + 100.81 - 9.318 = 526.64 \text{ J}$$

Nyní již můžeme vypočítat spotřebované teplo dle (a):

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 = 5536.7 + 526.64 = 6063.3 \text{ J}$$

Plyn celkem přijal teplo 6063.3 J.