

2.6.5 Výměny tepla při změnách skupenství

Předpoklady: 2604

Opakování: Teplo se spotřebovává na dva druhy dějů:

- zvyšování teploty: $Q = mc\Delta t$,
- změna skupenství: $Q = ml_x$.

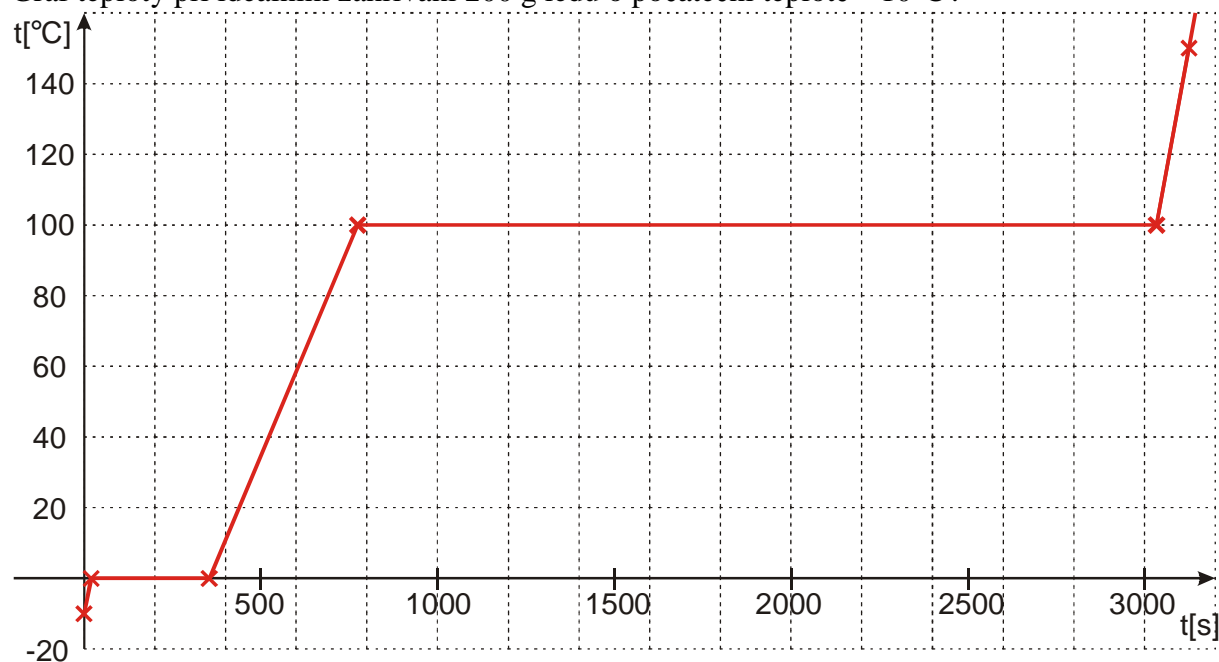
Tepelné konstanty vody: $c(\text{led}) = 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $l_t = 334000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$,

$c(\text{voda}) = 4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, $l_v = 2260000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$, $c(\text{pára}) = 1840 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Pedagogická poznámka: Studenti si na začátku hodiny opíší tepelné konstanty vody s tím, že je budou potřebovat v následujícím průběhu hodiny.

Př. 1: V uzavřené nádobě, která udržuje stálý vnitřní tlak, je umístěno 200 g drceného ledu o teplotě -10°C . Nádobu začneme rovnoměrně zahřívát (stálým výkonem). Nakresli graf, který zachycuje závislost teploty vody na čase v průběhu zahřívání.

Graf teploty při ideálním zahřívání 200 g ledu o počáteční teplotě -10°C .



Pedagogická poznámka: Většina studentů kreslí grafy, které se správnému výsledku podobají. Během kontroly před zveřejněním se u těch lepších snažím, aby jejich grafy byly co nejsprávnější (délky ohřívání, strmosti grafů), u horších studentů jde o to, aby se v jejich grafech alespoň objevily dvě teploty, na kterých se ohřívání dočasně zastaví.

Př. 2: Urči tepelný výkon vařiče. Souřadnice křížků: $[0; -10]$, $[20; 0]$, $[354; 0]$, $[774; 100]$, $[3034; 100]$, $[3126; 150]$.

Čas značím řeckým písmenem τ .

Ohřívání ledu

$$\tau = 20 \text{ s}, \Delta t = 10^\circ\text{C}, m = 0,2 \text{ kg}, c = 2000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, P = ?$$

$$Q = mc\Delta t = P\tau \Rightarrow P = \frac{mc\Delta t}{\tau} = \frac{0,2 \cdot 2000 \cdot 10}{20} \text{ W} = 200 \text{ W}$$

Tání ledu

$$\tau = 354 - 20 \text{ s} = 334 \text{ s}, m = 0,2 \text{ kg}, l_t = 334000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}, P = ?$$

$$Q = ml_t = P\tau \Rightarrow P = \frac{ml_t}{\tau} = \frac{0,2 \cdot 334000}{334} \text{ W} = 200 \text{ W}$$

Ohřívání vody

$$\tau = 774 - 354 \text{ s} = 420 \text{ s}, \Delta t = 100^\circ\text{C}, m = 0,2 \text{ kg}, c = 4200 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, P = ?$$

$$Q = mc\Delta t = P\tau \Rightarrow P = \frac{mc\Delta t}{\tau} = \frac{0,2 \cdot 4200 \cdot 100}{420} \text{ W} = 200 \text{ W}$$

Vyvaření vody

$$\tau = 3034 - 774 \text{ s} = 2260 \text{ s}, m = 0,2 \text{ kg}, l_v = 2260000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}, P = ?$$

$$Q = ml_v = P\tau \Rightarrow P = \frac{ml_v}{\tau} = \frac{0,2 \cdot 2260000}{2260} \text{ W} = 200 \text{ W}$$

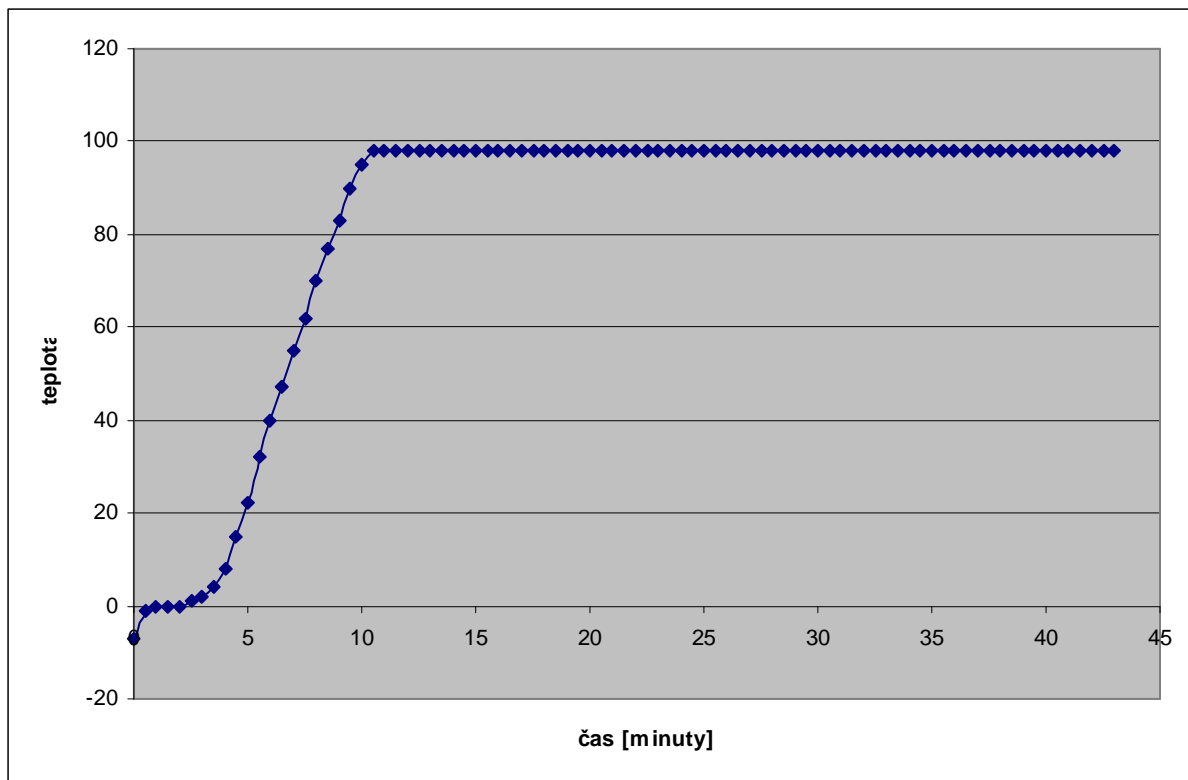
Ohřívání páry

$$\tau = 3126 - 3034 \text{ s} = 92 \text{ s}, \Delta t = 50^\circ\text{C}, m = 0,2 \text{ kg}, c = 1840 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, P = ?$$

$$Q = mc\Delta t = P\tau \Rightarrow P = \frac{mc\Delta t}{\tau} = \frac{0,2 \cdot 1840 \cdot 50}{92} \text{ W} = 200 \text{ W}$$

Pedagogická poznámka: Při hodině samozřejmě nepočítají studenti všechny varianty. Rozdělím je do skupin, každá použije na výpočet jednu část grafu.

Reálný průběh experimentu:



Př. 3: Do kýble se sedmi litry vody o teplotě 15°C přilijeme $0,5\text{kg}$ roztaveného olova o teplotě tání. Urči konečnou teplotu vody (a olova).

$$l_t(\text{Pb}) = 23000\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}, \quad c(\text{Pb}) = 129\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \quad t_t = 327^{\circ}\text{C}, \quad c(\text{H}_2\text{O}) = 4200\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \quad t = ?$$

$$\text{Platí: } Q(\text{Pb}) = Q(\text{H}_2\text{O})$$

Teplota odevzdaná olovem: skupenské teplo tuhnutí + teplo uvolněné olovem při ochlazení z 327°C na konečnou teplotu: $Q(\text{Pb}) = m_o l_t + m_o c_o \Delta t_o$

Teplota přijatá vodou: teplo potřebné k ohřátí vody: $Q(\text{H}_2\text{O}) = m_v c_v \Delta t_v$.

$$m_o l_t + m_o c_o \Delta t_o = m_v c_v \Delta t_v$$

$$m_o l_t + m_o c_o (t_t - t) = m_v c_v (t - t_v)$$

$$m_o l_t + m_o c_o t_t - m_o c_o t = m_v c_v t - m_v c_v t_v$$

$$m_o l_t + m_o c_o t_t + m_v c_v t_v = m_v c_v t + m_o c_o t$$

$$m_o l_t + m_o c_o t_t + m_v c_v t_v = t (m_v c_v + m_o c_o)$$

$$\frac{m_o l_t + m_o c_o t_t + m_v c_v t_v}{m_v c_v + m_o c_o} = t$$

$$t = \frac{m_o l_t + m_o c_o t_t + m_v c_v t_v}{m_v c_v + m_o c_o} = \frac{0,5 \cdot 23000 + 0,5 \cdot 129 \cdot 327 + 7 \cdot 4200 \cdot 15}{7 \cdot 4200 + 0,5 \cdot 129}^{\circ}\text{C} = 16,1^{\circ}\text{C}$$

Voda s olovem budou mít teplotu $16,1^{\circ}\text{C}$.

Př. 4: Do uzavřené nádoby vhodíme 2kg ledu o teplotě -15°C , 1kg vody 30°C a $0,5\text{kg}$ vodní páry o teplotě 120°C . Urči výsledný stav v nádobě.

Problém: nemůžeme sestavit rovnici, protože nevíme, jaký bude konečný stav:

- Změní se všechno na vodu o teplotě t ?
- Roztaje pouze část ledu a získáme tak směs ledu a vody o teplotě 0°C ?
- Roztaje pouze část páry a získáme tak směs páry a vody o teplotě 100°C ?

⇒ pro každý z uvedených případů musíme sestavovat jinou rovnici.

Jiný přístup: převedeme všechna skupenství na jednu teplotu a jedno skupenství, zjistíme energetickou bilanci a podle ní přizpůsobíme výsledek.

Převedeme všechny části na vodu o teplotě 100°C .

2 kg **ledu o teplotě -15°C na vodu o teplotě 100°C ⇒ teplo dodáváme.**

$$Q = mc_l \Delta t_1 + ml_t + mc_v \Delta t_2 = 2 \cdot 15 \cdot 2000 + 2 \cdot 334000 + 2 \cdot 4200 \cdot 100 \text{ J} = 1568000 \text{ J}$$

1 kg **vody o teplotě 30°C na vodu o teplotě 100°C ⇒ teplo dodáváme.**

$$Q = mc_v \Delta t = 1 \cdot 4200 \cdot 70 \text{ J} = 294000 \text{ J}$$

0,5 kg **páry o teplotě 120°C na vodu o teplotě 100°C ⇒ teplo přijímáme.**

$$Q = mc_p \Delta t + ml_v = 0,5 \cdot 20 \cdot 1840 + 0,5 \cdot 2260000 \text{ J} = 1148400 \text{ J}$$

Celková bilance:

- $1148400 - 1568000 - 294000 \text{ J} = -713600 \text{ J}$
- 3,5 kg vody o teplotě 100°C

⇒ voda bude studenější.

Ochlazování vody: $Q = mc \Delta t$

$$\Delta t = \frac{Q}{mc} = \frac{713600}{3,5 \cdot 4200} ^\circ\text{C} = 48,5^\circ\text{C} \Rightarrow \text{voda se ochladí na } 51,5^\circ\text{C}.$$

Smícháním součástí uvedených v zadání získáme po ustálení 3,5 kg vody o teplotě $51,5^\circ\text{C}$.

Př. 5: Prostuduj tepelné konstanty vody a ethanolu a sestav návod na destilaci. Proč je pro dosažení většího podílu alkoholu nutné destilovat vícekrát?

Voda: $t_v = 100^\circ\text{C}$

Lih: $t_v = 78,4^\circ\text{C}$

Zahřejeme směs vody a lihu na teplotu $78,4^\circ\text{C}$ a nebudeme teplotu zvyšovat. Lih tak bude vařit, voda se bude pouze vypařovat (tomu nezabráníme).

Voda se vypařuje za všech teplot, a proto bude výsledný roztok obsahovat kromě lihu i vodu.

Př. 6: Při skutečné destilaci se zahřívání zastavuje ještě jednou na teplotě 65°C . Vysvětli proč.

65°C je teplota varu metanolu, který je jedovatý. Zahřátím na 65°C můžeme od zbytku oddělit metanol.

Př. 7: Průmyslově se vyrábí daleko více lihu, než se spotřebovává v potravinářství. Většina lihu je proto denaturalizována (znehodnocena) přidáním jedovatých přísad, které mají zabránit tomu, aby lidé tento lih kupovali místo lihu potravinářského, který je zdaněn spotřební daní a proto je daleko dražší. Jaké vlastnosti musí mít denaturační přísady?

Musí mít stejnou teplotu varu jako normální lih, aby je nebylo možné odstranit destilací.

Shrnutí: