

# FYZIKA

## 7. ZMĚNY SKUPENSTVÍ LÁTEK

STUDIJNÍ TEXTY PRO 2. ROČNÍK

Frolíková Martina  
Augustynek Martin  
Adamec Ondřej

OSTRAVA 2007

*Budeme rádi, když nám jakékoliv případné dotazy a připomínky k textům zašlete na kterýkoliv z těchto kontaktů:*

[martina.frolikova@iuventas.cz](mailto:martina.frolikova@iuventas.cz)

[martin.augustynek@iuventas.cz](mailto:martin.augustynek@iuventas.cz)

[ondrej.adamec@iuventas.cz](mailto:ondrej.adamec@iuventas.cz)

## Obsah

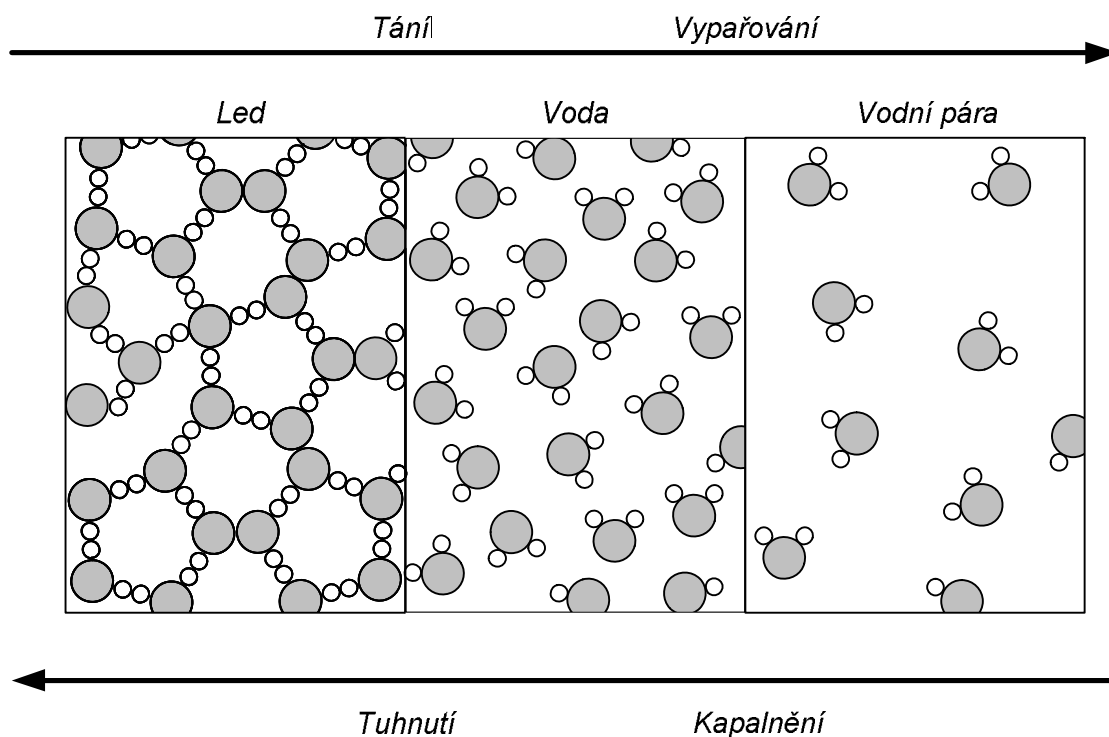
|  |           |
|--|-----------|
| <b>7. Změny skupenství látek.....</b>              | <b>1</b>  |
| <b>7.1 Změny skupenství - úvod .....</b>           | <b>4</b>  |
| <b>7.2 Tání .....</b>                              | <b>6</b>  |
| <b>7.3 Tuhnutí.....</b>                            | <b>9</b>  |
| 7.3.1 Změna objemu tělesa při tání a tuhnutí ..... | 9         |
| 7.3.2 Závislost teploty tání na vnějším tlaku..... | 10        |
| <b>7.3 Sublimace a desublimace.....</b>            | <b>11</b> |
| <b>7.4 Vypařování a kapalnění .....</b>            | <b>12</b> |
| <b>7.5 Sytá pára .....</b>                         | <b>16</b> |
| <b>7.6 Fázový diagram .....</b>                    | <b>18</b> |
| <b>7.7 Vodní pára v atmosféře .....</b>            | <b>21</b> |

## 7.1 Změny skupenství - úvod

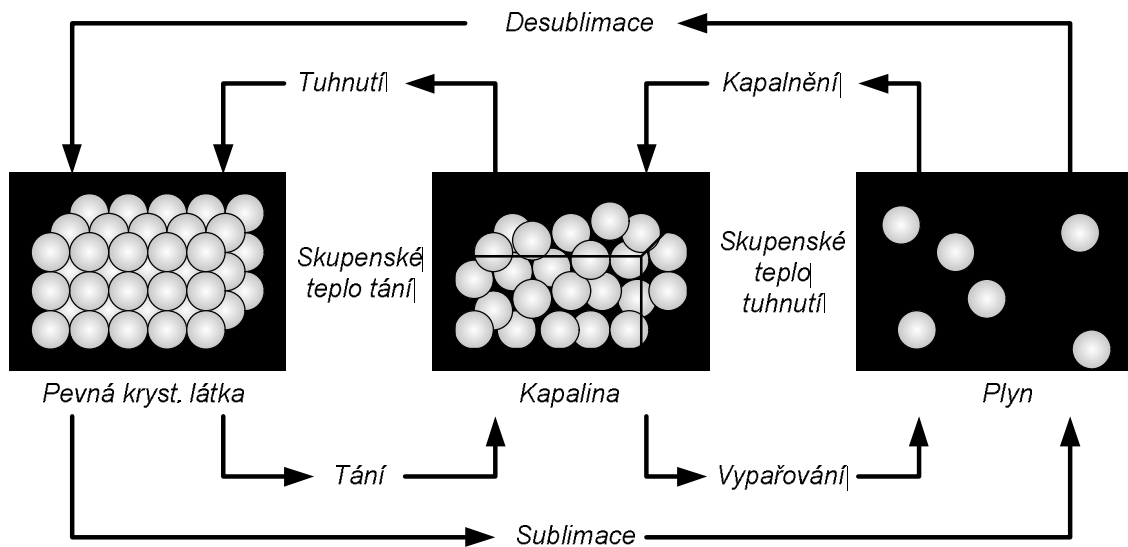
Každá látka se může vyskytovat jako plynná, kapalná nebo pevná. Např.  $H_2O$  vytváří vodní páru, vyskytuje se jako voda nebo led.

Fyzikální děj, při kterém se mění skupenství látky, nazýváme změna skupenství látek.

Mezi změny skupenství patří tání a tuhnutí, vypařování (zvláštním případem je var) a kapalnění, sublimace a desublimace.



Obrázek 1- Uspořádání molekul vody v různých skupenstvích, Změny skupenství

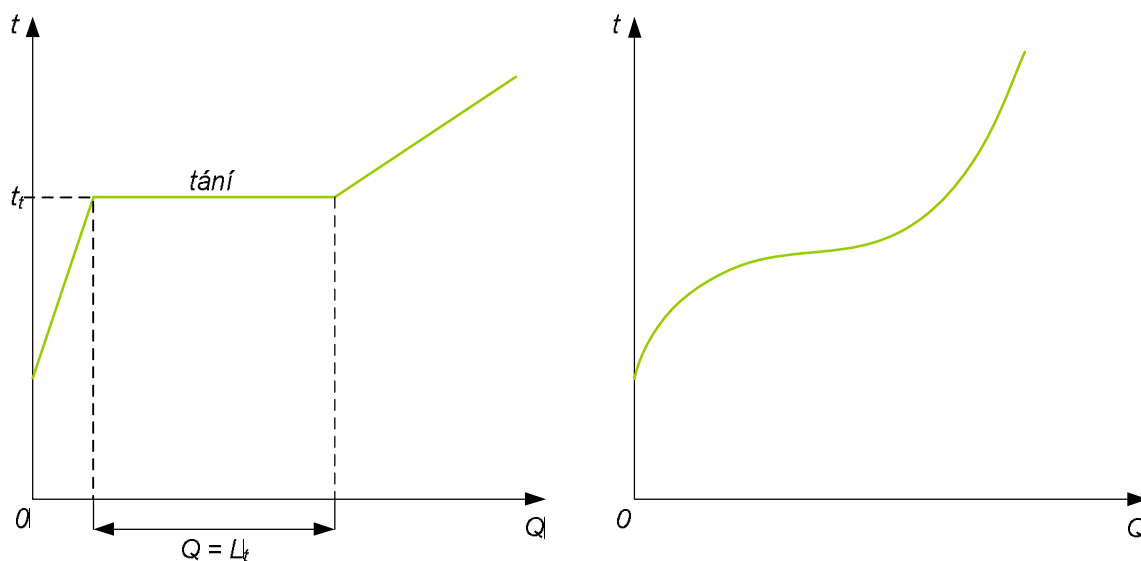


Obrázek 2 - Přehled změn skupenství

## 7.2 Tání

Zahříváme-li těleso z krystalické látky, např. led, zvyšuje se jeho teplota a po dosažení teploty tání  $t_t$  se těleso přeměňuje na kapalinu téže látky. Krystalická látka taje. Od tohoto okamžiku se teplota soustavy pevná látka – kapalina nemění, a to tak dlouho, dokud všechna látka neroztaje. Přitom látce nepřetržitě dodáváme teplo. Jakmile všechna krystalická látka roztaje a dál dodáváme teplo, začne teplota vzniklé kapaliny vzrůstat.

Během tání pevného tělesa je v rovnovážném stavu pevné a kapalné skupenství. Teplota soustavy se nemění a je rovna teplotě tání. Veškeré teplo dodávané soustavě při tání je využito na rozrušení krystalové mřížky a na práci vykonanou při změně objemu.



Obrázek 3 – Vlevo - Graf závislosti teploty krystalické látky na dodávaném teple

Vpravo – Graf závislosti teploty amorfni látky na dodávaném teple

Různé látky mají různé teploty tání. Pro danou krystalickou látku závisí teplota tání na vnějším tlaku, při kterém tání probíhá. V tabulkách se uvádějí teploty tání při normálním tlaku ( 101 325 Pa) a nazývají se **normální teploty tání**.

Několik příkladů teplot tání:

- Teplota tání kyslíku  $-218,4\text{ °C}$
- Teplota tání olova  $327,4\text{ °C}$
- Teplota tání ledu  $0\text{ °C}$

➤ Teplota tání zlata

1064,4 °C

Teplo, které přijme pevné těleso již zahřáté na teplotu tání, aby se změnilo na kapalinu téže teploty, se nazývá skupenské teplo tání  $L_t$ . Jednotkou této veličiny je *joule J*.

Pro tělesa z různých látek je veličina  $L_t$  různá. Proto zavádíme **měrné skupenské teplo tání  $l_t$** , definovanou vztahem:

$$l_t = \frac{L_t}{m}$$

Jednotkou měrného skupenského tepla tání je  $J \cdot kg^{-1}$

Se změnou objemu při tání souvisí změna hustoty příslušné látky, z nichž vytvořená tělesa zvětšují (zmenšují) objem, mají ve skupenství pevném větší (menší) hustotu než ve skupenství kapalném. Např. led má při teplotě 0 °C hustotu  $918 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , voda při téže teplotě  $999,8 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Největší hustotu, tedy  $999,97 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , má voda při teplotě 4 °C.

Protože led má menší hustotu než voda, plave na vodě a svou nízkou tepelnou vodivostí zabraňuje zamrzání vody do hloubky.

Teplo, které přijme 1 kg pevné látky při teplotě tání, aby se změnil na kapalinu téže teploty, nazýváme měrné skupenské teplo tání.

Měrné skupenské teplo tání je důležitou tepelnou konstantou, pro různé látky má různou hodnotu, některé hodnoty uvádí následující tabulka:

| látky                          | W  | Pb | SN | Ag  | Cu  | Fe  | led | Al  | NaCl |
|--------------------------------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| $\frac{l_t}{kJ \cdot kg^{-1}}$ | 19 | 23 | 59 | 105 | 205 | 279 | 334 | 397 | 500  |

Poměrně velká hodnota měrného skupenského tepla tání ledu je příčinou toho, že led a sníh tají v přírodě jen pomalu. Tím se omezuje vznik náhlých záplav.

*Příklad:*

*Vypočtete teplo, které je potřeba dodat tělesu z mědi o hmotnosti 500 g a teploty 20 °C, aby se roztavil. Tepelné ztráty do okolí zanedbejte.*

*Řešení:*

*Měděnému tělesu je třeba dodat jednak teplo  $Q_1 = c \cdot m \cdot (t_t - t_1)$ , aby zvýšilo teplotu z počáteční hodnoty  $t_1$  na teplotu tání  $t_t$ , jednak skupenské teplo tání  $L_t = m \cdot l_t$ , aby se roztavilo a mělo teplotu tání. Celkové teplo  $Q = Q_1 + L_t$ . Zadané hodnoty v textu musíme doplnit z tabulek o měrnou tepelnou kapacitu mědi, teplotu tání mědi a o měrné skupenské teplo tání této látky.*

$$m = 0,5 \text{ kg}, t_1 = 20 \text{ °C}, t_t = 1083 \text{ °C}, c = 383 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, l_t = 205 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}, Q = ?$$

$$Q = Q_1 + L_t = c \cdot m \cdot (t_t - t_1) + m \cdot l_t = m [c (t_t - t_1) + l_t]$$

$$Q = 0,5 \cdot [383 (1083 - 20) + 205 \cdot 10^3] \text{ J} = 306 \text{ kJ}$$

*Tělesu z mědi je potřeba dodat celkové teplo přibližně 306 kJ.*



## 7.3 Tuhnutí

Přechod látky ze skupenství kapalného ve skupenství pevné je **tuhnutí**. Pro chemicky čisté látky je teplota tuhnutí rovna teplotě tání, za téhož vnějšího tlaku. Vzniká-li krystalická látka, jev nazýváme **krystalizace**.

Při krystalizaci nevzniká pevné skupenství okamžitě. V kapalině se po dosažení teploty krystalizace začnou vytvářet vlivem vazebných sil krystalizační jádra (obr. a). K nim se připojují a pravidelně uspořádávají další částice látky (obr. b - e). V tavenině tak vzniká při krystalizaci soustava volně se pohybujících se krystalků nepravidelného tvaru. V okamžiku, kdy všechna látka ztuhne, se krystalky vzájemně dotýkají a vytvářejí zrna (obr. f). Tímto způsobem vzniká **polykrystalická látka**. Velikost zrn ovlivňuje vlastnosti krystalické látky.

Vytvoří-li se v tavenině pouze jeden zárodek, ke kterému se postupně připojují částice, vznikne **monokrystal**.

Při tuhnutí odevzdá kapalina svému okolí **skupenské teplo tuhnutí**. Co do hodnoty je stejné jako skupenské teplo tání pevného tělesa z téže látky a stejné hmotnosti. Také **měrné skupenské teplo tuhnutí** je u téže látky za stejných podmínek stejné jako měrné skupenské teplo tání.

### 7.3.1 Změna objemu tělesa při tání a tuhnutí

Většina látek při tání zvětšuje svůj objem a při tuhnutí ho zmenšuje. Např. relativní zvětšení objemu při tání olova je 3,4 %. Naproti tomu některé látky jako led, germanium a slitiny, při tání svůj objem zmenšují a při tuhnutí zvětšují.

U ledu je relativní zvětšení objemu zvláště veliké, asi 9 %. Tato vlastnost vyplývá z jeho krystalové mřížky. Krystalová mřížka ledu je prostoupena prostornými kanálky. Při tání se mřížka bortí a volný prostor se postupně zaplňuje molekulami vody. Neuspořádanému rozložení molekul  $H_2O$  ve vodě proto odpovídá menší objem uspořádanému rozložení molekul  $H_2O$  v krystalové mřížce ledu.

### 7.3.2 Závislost teploty tání na vnějším tlaku

Teplota tání krystalické látky závisí na tlaku okolního prostředí.

U látek, u nichž je tání doprovázeno zvětšením objemu, roste při zvýšení tlaku také teplota tání.

Je-li tání doprovázeno zmenšením objemu, pak se při zvýšení vnějšího tlaku sníží teplota tání látky.

Zvětšení objemu při tuhnutí vody má značný význam v přírodě. Led má menší hustotu než voda, proto plave na vodě a svou nízkou tepelnou vodivostí zabraňuje zamrzání vody do větší hloubky (viz anomálie vody).

V puklině hory zmrzlá voda zvětšením objemu vyvolá velké tlakové síly, které horninu roztrhnou (mrazová eroze). Podobně tomu při praskání zdiva nebo potrubí v zimním období.

## 7.3 Sublimace a desublimace

Přeměna látek z pevného skupenství přímo ve skupenství plynné se nazývá sublimace. Za běžného tlaku sublimuje např. jod, pevný oxid uhličitý (tzv. suchý led), led nebo sníh. Rovněž všechny vonící nebo páchnoucí pevné látky sublimují.

**Měrné skupenské teplo sublimace**  $l_s$  je definováno vztahem:

$$l_s = \frac{L_s}{m}$$

Kde  $L_s$  je skupenské teplo sublimace přijaté pevným tělesem o hmotnosti  $m$  při sublimaci za dané teploty.

Měrné skupenské teplo sublimace závisí na teplotě, při které pevná látka sublimuje. Např. pro led při teplotě  $0\text{ }^\circ\text{C}$  je  $l_s = 2,8\text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ .

Je-li sublimující látka dostatečné hmotnosti v uzavřené nádobě, sublimuje tak dlouho, až se vytvoří **rovnovážný stav mezi pevným skupenstvím a vzniklou párou**. Objemy pevné látky a páry se dále nemění, tlak páry a teplota soustavy zůstávají konstantní.

Přeměna látky ze skupenství plynného přímo ve skupenství pevné se nazývá **desublimace**. Příkladem je vytvoření jinovatky z vodní páry za teplot pod  $0\text{ }^\circ\text{C}$ .

## 7.4 Vypařování a kapalnění

**Vypařováním** nazýváme přechod látky ze skupenství kapalného do skupenství plynného. Na rozdíl od tání probíhá vypařování z povrchu kapaliny za každé teploty.

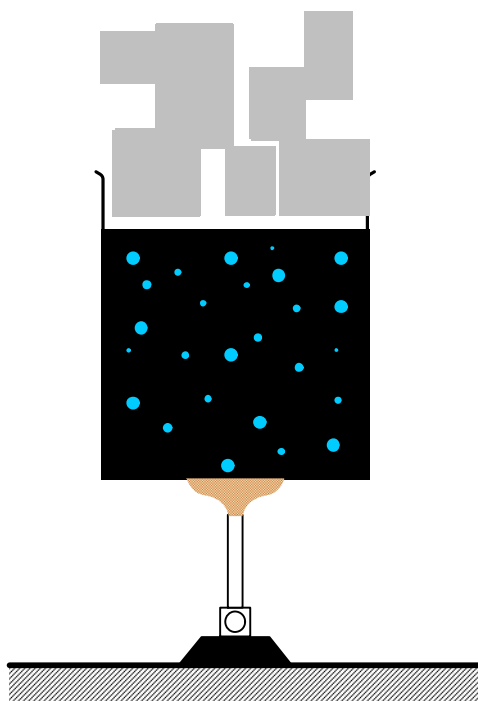
Různé kapaliny se za jinak stejných podmínek vypařují různou rychlostí.

Chceme-li kapalinu přeměnit v páru téže teploty, musí kapalina přijmout skupenské teplo vypařování  $L_v$ . Jednotkou této veličiny je *joule (J)*.

Měrné skupenské teplo vypařování je definováno:

$$l_v = \frac{L_v}{m} \quad \text{jednotkou je } \text{J.kg}^{-1}$$

Zahříváme-li kapalinu, pozorujeme, že při dosažení určité teploty za daného okolního tlaku se uvnitř kapaliny vytvářejí bubliny páry. Bubliny postupně zvětšují svůj objem a vystupují k povrchu. Kapalina se vypařuje nejen na svém povrchu, ale i uvnitř. Tento děj nazýváme **var kapaliny**. Jev je zobrazen na obrázku č.4.

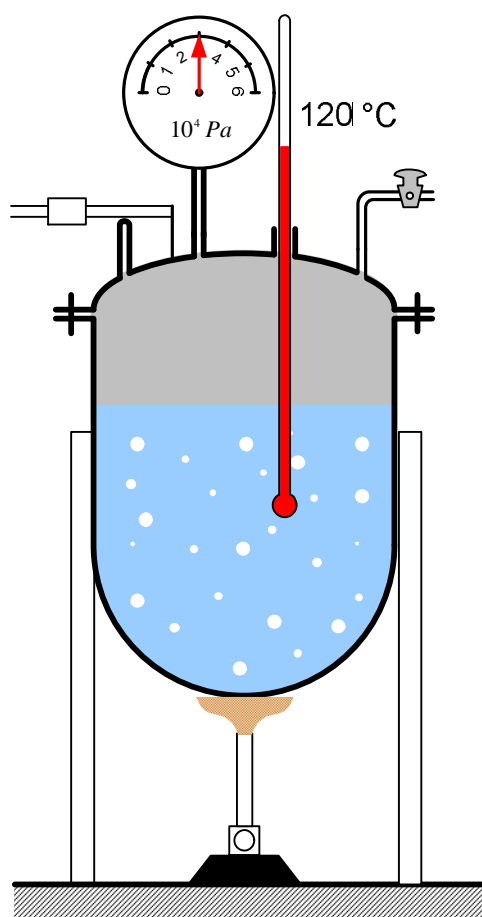


Obrázek 4 - Var kapaliny

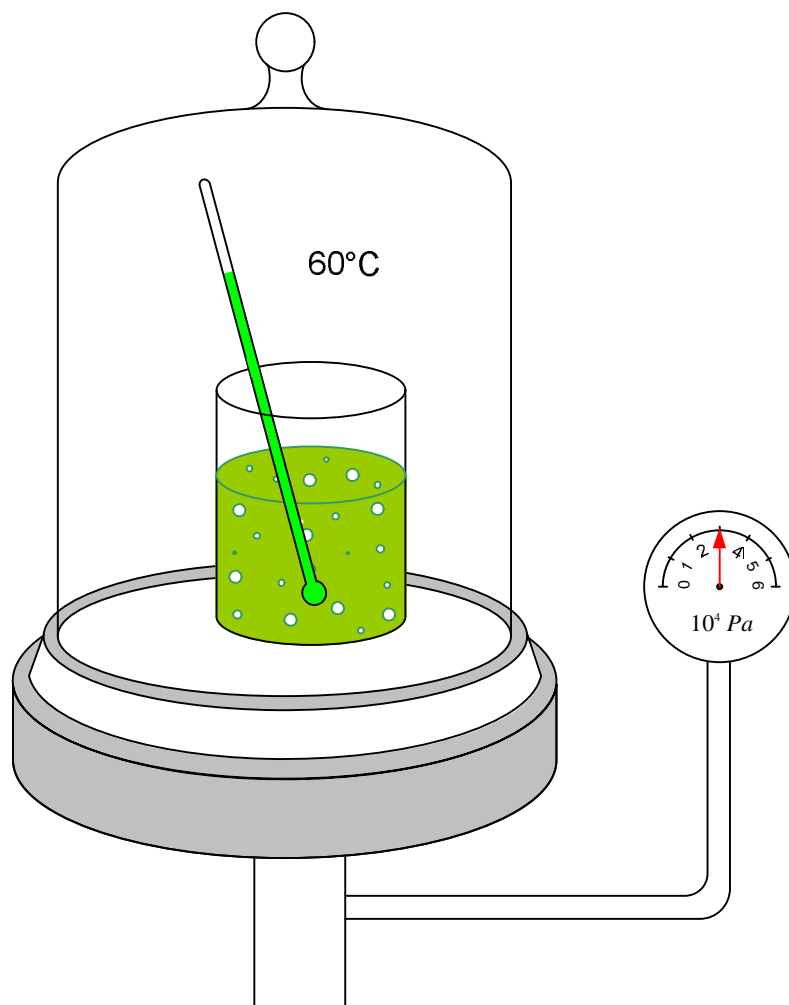
Teplota  $t_v$ , při které nastává var za daného tlaku se nazývá **teplota varu**. Pokud je to za normálních podmínek, pak se jedná o **normální teplotu varu**.

Teplota varu kapaliny je závislá na vnějším tlaku. S rostoucím tlakem se zvyšuje.

Závislost tlaku na teplotě varu ukazují následující obrázky. Při zvýšení tlaku se teplota varu zvyšuje a při snížení tlaku se teplota varu snižuje.



Obrázek 5 - Var kapaliny v Papinově hrnci při tlaku vyšším než je tlak atmosférický



Obrázek 6 - Var kapaliny pod recipientem vývěvy při tlaku nižším než je atmosférický tlak

**Měrné skupenské teplo varu** se rovná měrnému skupenskému teplu vypařování při teplotě varu kapaliny.

*Příklad:*

*Voda o hmotnosti 10 kg a teplotě 20 °C se ohřeje na teplotu 100 °C a pak se všechna přemění na páru téže teploty. Jaké celkové teplo soustava přijme? Jaká část z toho připadá na změnu skupenství?*

*Řešení:*

*$m = 10 \text{ kg}$ ,  $t_1 = 20 \text{ °C}$ ,  $t_v = 100 \text{ °C}$ ,  $\Delta t = 80 \text{ °C}$ ,  $c = 4,18 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,  
 $l_v = 2,26 \cdot 10^6 \text{ J.kg}^{-1}$ ,  $Q = ?$ ,  $x = ?$*

*Zvýší-li se teplota vody z  $t_1$  na  $t_v$ , přijme voda z okolí teplo*

$$Q_1 = cm \Delta t = 4,18 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 80 = 3,34 \text{ MJ}$$

*K přeměně vody teploty 100 °C na páru téže teploty je třeba dodat skupenské teplo varu  $L_v = m \cdot l_v = 10 \cdot 2,26 \cdot 10^6 \text{ J} = 22,6 \text{ MJ}$*

$$\text{Celkové přijaté teplo } Q = Q_1 + L_v = 3,34 + 22,6 = 26 \text{ MJ}$$

*Na přeměnu skupenství z celkového dodaného tepla připadá:*

$$x = \frac{L_v}{Q} = \frac{22,6}{26} \cdot 100 \approx 87\%$$

*Celkové přijaté teplo je přibližně 87 %*

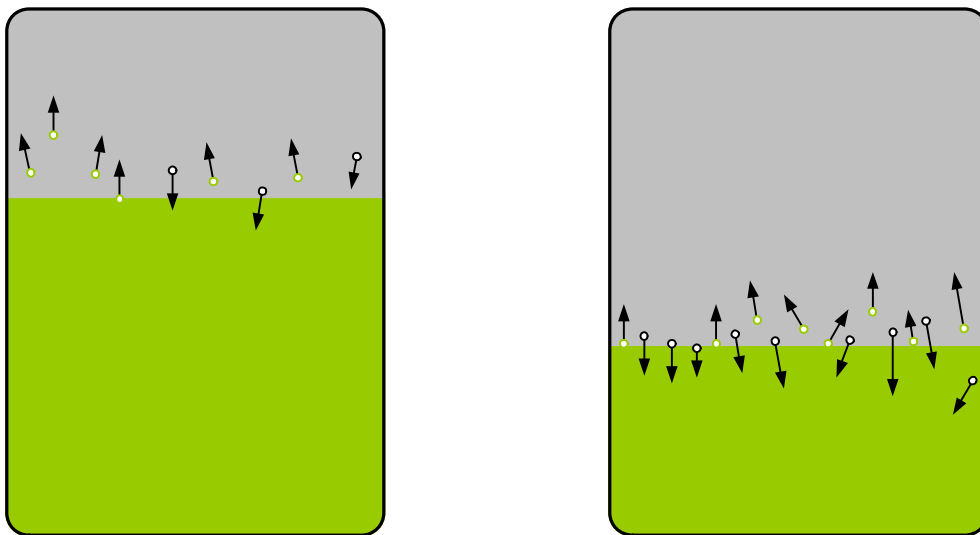
## 7.5 Sytá pára

V otevřeném prostoru probíhá vypařování až do úplného vypaření kapaliny (voda ve sklenici). Vypařuje-li se kapalina v uzavřené nádobě, přestane se po určité době objem kapaliny zmenšovat a objem páry zvětšovat. Vytvoří se **rovnovážný stav**.

**Pára, která je v rovnovážném stavu se svou kapalinou se nazývá sytá pára. Tlak syté páry nezávisí při stálé teplotě na objemu páry.**

Zvýšíme-li teplotu kapaliny a její syté páry, zvětší se vnitřní energie soustavy. Další část kapaliny se vypaří, čímž vzroste hustota molekul syté páry. Současně se zvětší střední rychlost molekul syté páry. Obě změny způsobí, že vzroste tlak syté páry.

Tlak syté páry nad kapalinou roste s rostoucí teplotou.



Obrázek 7 - Vypařování kapaliny v uzavřené nádobě, vlevo začátek vypařování, vpravo už rovnovážný stav.

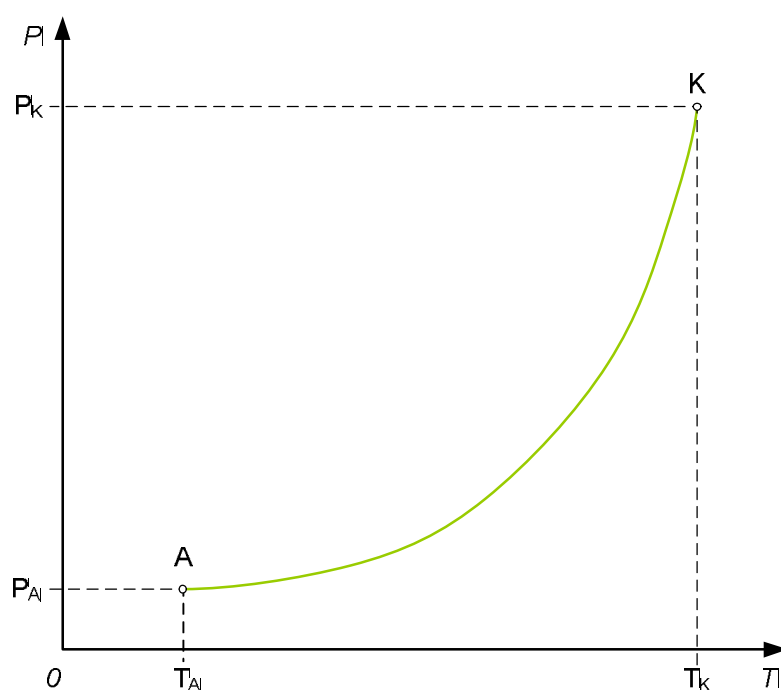


**Graf závislosti tlaku syté páry na teplotě se nazývá **křivka syté páry**.**

Závislost není lineární a je pro různé látky různá.

Každý bod křivky syté páry odpovídá jedinému stavu syté páry a současně kapaliny, která je s ní v rovnovážném stavu. Tento stav je určen teplotou  $T$  a tlakem  $p_s$ .

Počátečnímu bodu  $A$  křivky syté páry přísluší nejmenší hodnota teploty  $T_A$  a tlaku  $p_A$ , při kterých existuje kapalina a její sytá pára v rovnovážném stavu. Teplota  $T_A$  je současně teplota tuhnutí kapaliny při tlaku  $p_A$ . Pro vodu je  $T_A = 273,16 \text{ K}$  ( $0,01 \text{ °C}$ ) a  $p_A = 6,1 \cdot 10^2 \text{ Pa}$ .



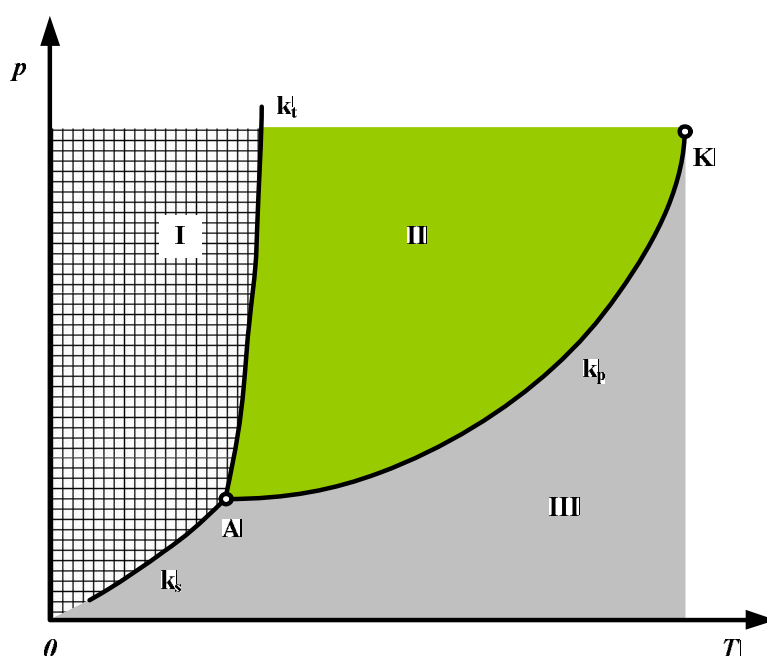
Obrázek 8 - Křivka syté páry

Při zvětšování teploty  $T$  rovnovážné soustavy kapalina a její sytá pára roste hustota páry, hustota kapaliny naopak klesá. Při tzv. **kritické teplotě**  $T_K$  jsou si obě hustoty rovny. Mezi kapalinou a její sytou párou zmizí rozhraní, soustava se stane stejnorodou. Při teplotě  $T > T_K$  již látka neexistuje v kapalném skupenství. Proto v bodě  $K$  křivka syté páry končí.

Koncový bod křivky nazýváme **kritický bod** a znázorňujeme **kritický stav látky**. Tento stav je popsán kritickou teplotou  $T_K$ , kritickým tlakem  $p_K$  a kritickým objemem  $V_K$ . Častěji se místo kritického objemu udává kritická hustota  $\rho_K$ .

## 7.6 Fázový diagram

V předchozích kapitolách jsme se zabývali rovnovážnými stavy vedle sebe existujících skupenství téže látky, např. kapaliny a její syté páry. Všechny tyto rovnovážné stavy lze znázornit v tzv. **fázovém diagramu** dané látky. Každý bod roviny fázového diagramu znázorňuje rovnovážný stav látky při zvolené teplotě a odpovídajícím tlaku.



Obrázek 9 - Fázový diagram látky

Fázový diagram se skládá ze tří křivek  $k_p$ ,  $k_t$  a  $k_s$ . Křivka  $k_p$  je **křivka syté páry**, jejíž body znázorňují různé rovnovážné stavy soustavy kapalina sytá pára. Zároveň je tato křivka grafem závislosti tlaku syté páry ne teplotě.

Druhou křivkou je **křivka tání**  $k_t$ . Body této křivky znázorňují rovnovážné stavy, ve kterých je vedle sebe pevné a kapalné skupenství (např. led ve vodě). Tato křivka není ukončena.

Třetí křivka je **sublimační křivka**  $k_s$ . Každý bod této křivky znázorňuje stav látky, ve kterém existuje vedle sebe pevná látka a její sytá pára.

Všechny tři křivky se stýkají v jednom bodě A. Tento bod se nazývá trojný bod vody a znázorňuje rovnovážný stav pevného, kapalného a plynného skupenství. Např. při teplotě  $T_A = 273,16 \text{ K}$  ( $0,01 \text{ }^\circ\text{C}$ ) a tlaku  $p_A = 6,1 \cdot 10^2 \text{ Pa}$  mohou

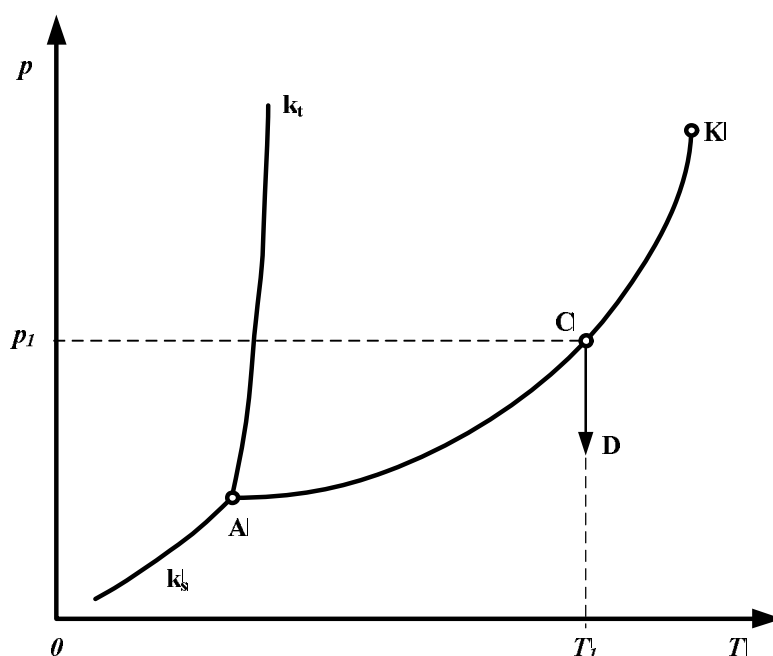
existovat v izolované nádobě led, voda a sytá pára.

**Teplota trojného bodu vody je základní teplota termodynamické teplotní stupnice.**

Křivky rozdělují rovinu na tři oblasti I, II, III. V každé oblasti se látka nachází v určitém skupenství:

- I – v pevném skupenství,
- II – v kapalném skupenství
- III – plynné skupenství látky, která má nižší tlak než sytá pára téže teploty. Toto skupenství nazýváme **přehřátá pára**.

Přehřátá pára je pára, která má nižší tlak a hustotu než sytá pára téže teploty.

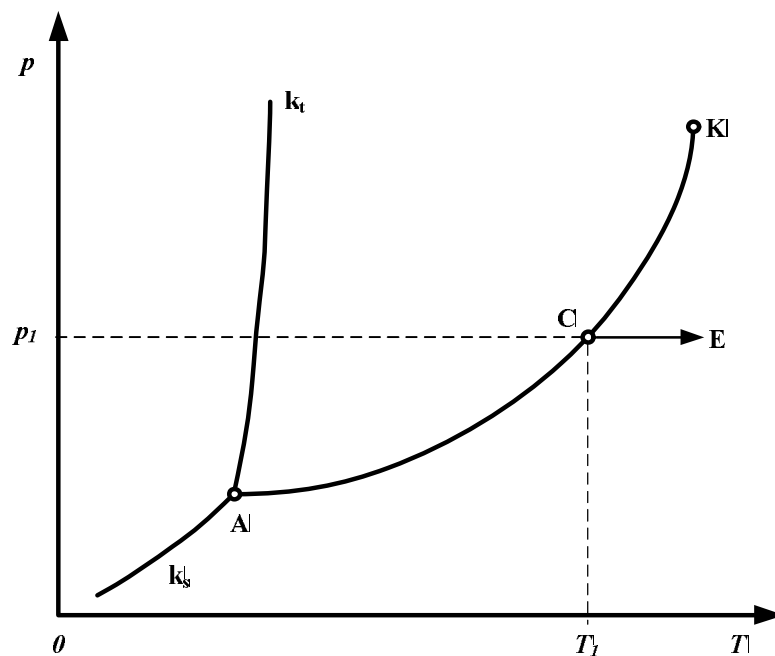


Obrázek 10 - Vznik přehřáté páry zvětšením objemu syté páry bez přítomnosti kapaliny

Pro přehřátou páru platí přibližně stavová rovnice ideálního plynu.

Přechod z jedné oblasti do druhé protnutím některé křivky představuje vždy změnu skupenství dané látky.

Změnu skupenství znázorňuje následující graf:



Obrázek 11 - Vznik přehřáté kapaliny zahříváním syté páry bez přítomnosti kapaliny

**Má-li být plynná látka zkapalněna, je třeba ji před kompresí ochladit pod kritickou teplotou.**

## 7.7 Vodní pára v atmosféře

Vodní páru v atmosféře popisujeme nejen tlakem a teplotou, ale absolutní a relativní vlhkostí vzduchu. Teplota, při níž se přehřátá vodní pára ve vzduchu mění v sytou vodní páru téže teploty, je teplota rosného bodu.

Definice **absolutní vlhkosti vzduchu**  $\Phi$ :

$$\Phi = \frac{m}{V} \quad \text{kde } m \text{ je hmotnost, } V \text{ je objem}$$

**Relativní vlhkost**  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{\Phi}{\Phi_m} \cdot 100\%$$

Přímo lze měřit relativní vlhkost vlhkoměrem

Vlhkost vzduchu lze také charakterizovat **rosným bodem**. Je to stav, popsáný při daném tlaku **teplotou rosného bodu**, na kterou bylo třeba izobaricky ochladit vzduch, aby se vodní pára stala sytou párou.

Z vodní páry vzniká na chladných předmětech rosa, nad povrchem země se tvoří mlha, ve větších výškách mraky. Je-li teplota rosného bodu nižší než 0 °C, tvoří se jinovatka, popř. sníh.

## Seznam použité literatury

- /1/ *Milan Bednařík, Miroslava Šíroká: Fyzika pro gymnázia – Mechanika. Prométheus. Praha 1993*
- /2/ *Karel Bartuška, Emanuel Svoboda: Fyzika pro gymnázia – Molekulová fyzika a termika. Prométheus. Praha 1993*
- /3/ *Oldřich Lepil, Milan Bednařík, Radmila Hýblová: Fyzika pro střední školy – I. Prométheus. 1993*
- /4/ *Oldřich Lepil, Milan Bednařík, Radmila Hýblová: Fyzika pro střední školy – II. Prométheus. 1993*
- /5/ *Pavel Tarábek, Petra červinková a kol.: Odmaturuj z fyziky. Nakladatelství Didaktik. Brno 2004*
- /6/ *Emanuel Svoboda, Karel Bartuška, Milan Bednařík, Oldřich Lepil, Miroslava Šíroká: Přehled středoškolské fyziky. Prométheus. 1996*