

## 11. Struktura a vlastnosti kapalin

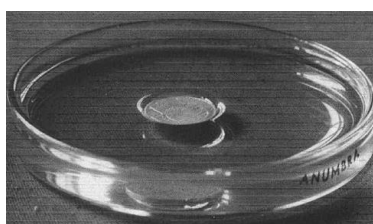
Poznámka 1: Zopakujme si úvodem, co víme o kapalných látkách z předcházejících otázek.

Kapaliny - vlastnosti:

- $E_p \approx E_k \dots E_p$  ( $E_k$ ) je vnitřní polohová (kinetická) energie částic kapaliny
- Vzdálenosti mezi částicemi jsou rovněž „malé“ řádově  $10^{-10}m$ , mezi částicemi působí „velké“ mezimolekulární síly, částice jsou určitým způsobem pravidelně uspořádány, ale pouze na velmi krátké vzdálenosti. Proto kapalina drží pohromadě, je nestlačitelná, ale tekutá. Její struktura je podobná struktuře amorfních látek.
- Částice kmitají kolem nestálých rovnovážných poloh.
- Kapalné těleso má stálý objem, ale nevlastní tvar nádoby, ve které se nachází.

Na volném povrchu kapaliny se nachází tzv. **povrchová vrstva kapaliny**, jejíž tloušťka je rovna poloměru sféry molekulového působení (řádově  $10^{-9}m$ ) a která se chová jako velmi tenká pružná blána.

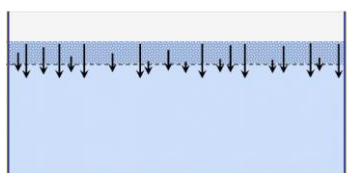
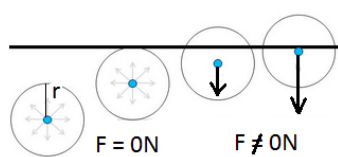
Poznámka: Experimentálně to dokazují např. pokusy, kdy ocelová žiletka, mince nebo jehla leží na vodní hladině, přestože jejich hustota je mnohem větší než hustota vody, jako by neplatil Archimédův zákon. Některý hmyz např. vodoměrka využívá chůzi po povrchové vrstvě.



**Sféra molekulového působení** je koule o poloměru  $r$ , v jejímž středu je molekula kapaliny. Okolní molekuly kapaliny na ni působí nezanedbatelnými silami, pokud jsou uvnitř sféry molekulového působení. Jsou-li vně sféry, jsou od ní příliš daleko a jejich silové působení zanedbáváme.

Existují dvě hlavní příčiny pozoruhodného chování povrchové vrstvy:

- Na molekuly v povrchové vrstvě působí okolní molekuly kapaliny nenulovou výslednou přitažlivou silou, která míří kolmo do kapaliny.



Poznámka: Z obrázků je zřejmé, že povrchová vrstva stlačuje kapalinu pod ní podobně, jako stlačuje pružná blána nafukovacího balónku vzduch uvnitř.

- Molekuly v povrchové vrstvě mají větší vnitřní polohovou energii než molekuly uvnitř kapaliny. Rozdíl mezi vnitřní potenciální energií molekul v povrchové vrstvě a vnitřní potenciální energií molekul uvnitř kapaliny se nazývá **povrchová energie**.

Poznámka: Má-li se zvětšit volný povrch kapaliny, je nutné přenést některé molekuly z vnitřku kapaliny do povrchové vrstvy, což je spojeno s konáním práce, která se projeví v přírůstku povrchové energie. Kapalné těleso se vždy snaží zaujmout tvar s nejmenší povrchovou energií, což je tvar koule. V beztížném stavu zaujme tvar koule každé kapalné těleso, na Zemi tomu mnohdy brání tíhová síla.

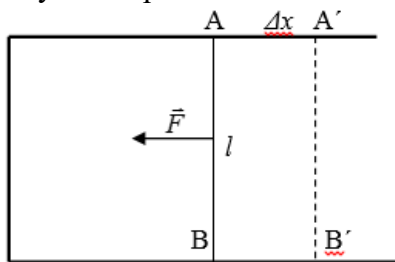
Matematicky lze vyjádřit povrchovou energii, případně její změnu, vztahy:

$$E = \sigma \cdot S \quad \Delta E = \sigma \cdot \Delta S,$$

kde  $\sigma$  je **povrchové napětí** (závisí na druhu kapaliny, pro různé kapaliny je jeho hodnota uvedena v MFCHT, s rostoucí teplotou klesá).

Podobně jako v každé jiné pružné bláně působí také v povrchové vrstvě kapaliny síly, které mají směr tečny k volnému povrchu, tzv. **povrchové síly**. Tyto síly způsobují v pružné vrstvě

„stav napětí“. Velikost povrchové síly, kterou působí např. tenká vrstva kapaliny na pohyblivou příčku rámečku délky  $l$  na obrázku, lze určit experimentálně.



Posunutím příčky délky  $l$  o vzdálenost  $\Delta x$  vykoná povrchová síla  $F$  práci  $W = 2 \cdot F \cdot \Delta x$ , protože kapalné těleso na obrázku má dva povrchy.

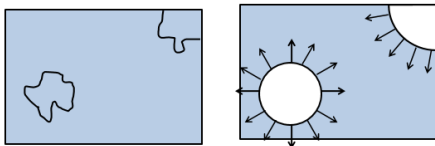
Díky tomu se změní povrchová energie o hodnotu  $\Delta E = 2 \cdot \sigma \cdot \Delta S = 2 \cdot \sigma \cdot l \cdot \Delta x$ . Z rovnosti  $W = \Delta E$  plyne pro velikost povrchové síly vztah:

$$F = \sigma \cdot l \quad [\sigma] = \text{J} \cdot \text{m}^{-2} = \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$$

Poznámka: Povrchové napětí lze vyjádřit dvěma způsoby:

$$\sigma = \frac{E}{S} = \frac{F}{l} \quad \text{Z vyjádření plyne, že povrchové napětí je}$$

číselně rovno povrchové energii 1 m<sup>2</sup> povrchu kapaliny nebo je číselně rovno povrchové síle, kterou by kapalina působila na pohyblivý rámeček o délce 1 m.



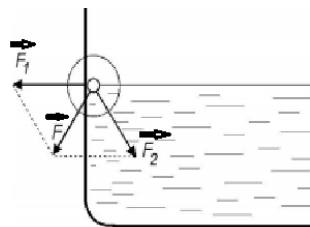
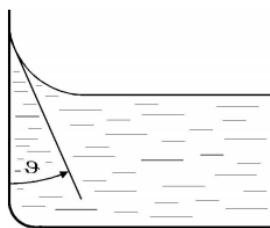
Existence a směr povrchových sil je názorně vidět při pokusu s nití položené na mýdlové bláně, zejména po propíchnutí blány uvnitř nití.

## Jevy na rozhraní tří prostředí – kapaliny, nádoby a plynu nad kapalinou

Poznámka: Vzhledem k velkým vzdálenostem mezi částicemi plynu se jich ve sféře molekulového působení molekuly kapaliny nachází tak málo, že lze jejich přítomnost zanedbat.

Jde o jevy, které nastávají v bezprostřední blízkosti místa, v němž se volný povrch kapaliny dotýká nádoby. Rozlišujeme dva odlišné případy:

1. Kapalina smáčí stěny nádoby = **elevace** ... pro tzv. úhel smáčení platí:  $0 < \nu < \frac{\pi}{2}$ .

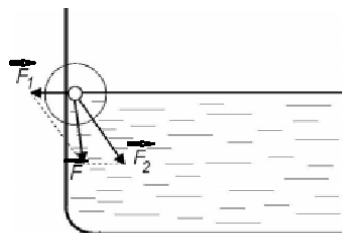
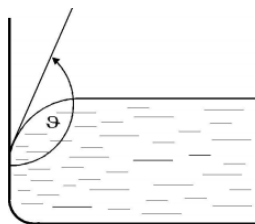


K elevaci dochází, když výsledná síla  $\vec{F}$ , působící na molekulu kapaliny uprostřed sféry molekulového působení, míří ven z nádoby. Volný povrch zaujme takový tvar, při kterém je na něj síla  $\vec{F}$  kolmá – dojde k elevaci. Pouze v takovém případě

nemá síla  $\vec{F}$  na volný povrch kapaliny pohybový účinek a volný povrch zůstává stabilní. K elevaci dochází například při kontaktu vody se sklem.

$\vec{F}_1$  ( $\vec{F}_2$ ) značí sílu, kterou na molekulu kapaliny uprostřed sféry molekulového působení působí okolní částice nádoby (okolní molekuly kapaliny).

2. Kapalina nesmáčí stěny nádoby = **deprese** .... Pro úhel smáčení platí:  $\frac{\pi}{2} < \nu < \pi$



K depresi dochází, když výsledná síla  $\vec{F}$ , působící na molekulu kapaliny uprostřed sféry molekulového působení, míří do nádoby. Volný povrch opět zaujme takový tvar, při kterém je na něj síla  $\vec{F}$  kolmá –

nastává deprese. K depresi dochází například při kontaktu rtuti se sklem.

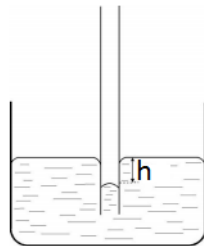
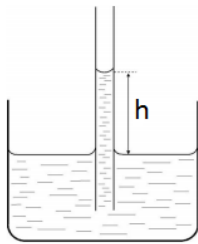
Poznámka: Může nastat ještě třetí případ, kdy výsledná síla  $\vec{F}$  nemíří ven ani dovnitř, ale kolmo dolů.

Volný povrch kapaliny zůstane vodorovný. Pro úhel smáčení platí:  $\nu = \frac{\pi}{2}$

## Kapilární jevy

Pokud je dostatečně nádoba malá, dojde k plynulému napojení zakřivené části v levé a v pravé části nádoby. Tento jev nastává v úzkých trubičkách tzv. kapilárách a je doprovázen zvýšením nebo snížením hladiny kapaliny v kapiláře oproti hladině kapaliny v nádobě – hovoříme o **kapilární elevaci** a o **kapilární depresi**.

### 1. Kapilární elevace 2. Kapilární deprese



Z rovnosti hydrostatického a kapilárního tlaku lze vypočítat výšku  $h$ :

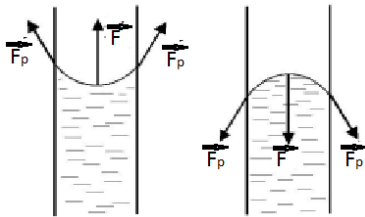
$$p_h = p_k$$

$$h \cdot \rho \cdot g = \frac{2 \cdot \sigma}{R}, \text{ kde } R \text{ je poloměr zakřivení volného}$$

povrchu kapaliny a v případě dokonalého smáčení ( $\nu = 90^\circ$  nebo  $180^\circ$ ) jde také poloměr kapiláry.

$$\text{Obecně platí: } h \cdot \rho \cdot g = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos \nu}{R}$$

Kapilární jevy jsou důsledkem povrchových sil, které působí sice v povrchové vrstvě, ale skrze ní působí i na kapalinu pod povrchovou vrstvou.



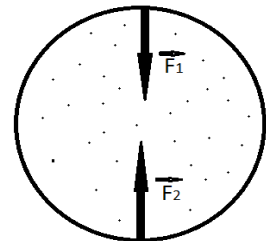
Z obrázku je zřejmé, že u zakřiveného povrchu kapaliny je výslednicí povrchových sil  $\vec{F}_p$  nenulová síla  $\vec{F}$ , která působí kolmo k volnému povrchu kapaliny. V případě kapilární elevace (deprese) míří nahoru (dolů) a vyvolá zvýšení (pokles) kapaliny v kapiláře.

Síla  $\vec{F}$  vyvolává pod zakřiveným povrchem tzv. **kapilární tlak**, jehož velikost je dána vztahem:

1.  $p_k = \frac{2\sigma}{R}$ , kde  $R$  je poloměr kulového zakřivení povrchu kapaliny

2.  $p_k = \frac{4\sigma}{R}$ , kde  $R$  je poloměr tenké kulové bubliny (má 2 zakřivené povrchy)

Poznámka: Názorně si můžeme kapilární tlak představit podobně jako tlak, pod kterým je stlačený vzduch pod zakřivenou pružnou gumovou blánou nafukovacího balónku. Pružná blána, která je ve spodní části balónku (v horní části balónku) působí na vzduch silou směrem nahoru (dolů), podobně jako stejně zakřivená povrchová vrstva v případě kapilární elevace (deprese), jak je zřejmé z obrázku.



**Poznámka: Využití popsaných jevů v praxi si studenti doplní samostatně!**

### Teplotní objemová roztažnost kapalin

Většina kapalin s rostoucí teplotou zvětšuje objem a s dobrou přesností lze užít vztah:

$$V_t \doteq V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t)$$

$$\rho_t = \frac{m}{V_t} = \frac{m}{V_0 \cdot (1 + \beta \cdot \Delta t)} \doteq \rho_0 \cdot (1 - \beta \cdot \Delta t), \text{ kde } \beta \text{ je teplotní součinitel objemové}$$

roztažnosti kapaliny.

Poznámka 1: Pro většinu kapalin je  $\beta \approx (10^{-4} \text{ až } 10^{-3})K^{-1}$

Poznámka 2: Pro velké teplotní rozdíly ...  $V_t \doteq V_0 \cdot (1 + \beta_1 \cdot \Delta t + \beta_2 \cdot (\Delta t)^2)$

**Anomálie vody** je jev charakteristický pro vodu při teplotách přibližně od 0°C do 4°C.

V tomto intervalu teplot je koeficient objemové roztažnosti záporný a voda se vzrůstající teplotou svůj objem snižuje, čímž dochází k nárůstu její hustoty. Největší hustotu má voda při teplotě 4°C a taková se udržuje u dna dostatečně hlubokých nádrží, což je klíčové pro přežití ryb v zimním období.

Anomálii vystihuje uvedený graf závislosti objemu vody o hmotnosti 1 kg na teplotě:

