

## 5 ŠTRUKTÚRA A VLASTNOSTI KVAPALÍN

Kvapaliny majú základný význam pre náš život. Pijeme ich, krv obieha v našich tepnách a žilách. Voda je najrozšírenejšia kvapalina, je podmienkou života na Zemi. Používame ju okrem pitia a varenia tiež na umývanie, kúpanie, pranie, zalievanie kvetov a plodín. V chladiacich okruhoch slúži na chladenie priemyselných technologických celkov a súčastí strojov. Vo výmenníkoch tepla sprostredkuje prenos vnútornej energie. Energii prúdiacej vody využívame vo vodných elektrárňach, vodných mlynoch. V aute je kvapalina v chladiči, v ostrekovači skiel, vo vykurovacom a chladiacom systéme, v hydraulickom rozvode, vo forme elektrolytu v elektrickej batérii. V bežnej praxi sú najrozšírenejšie kvapalinové teplomery.

V mechanike ste sa zaoberali mechanickými vlastnosťami kvapalín v pokoji alebo v pohybe. V tejto kapitole sa sústreďíme na vlastnosti povrchovej vrstvy kvapaliny a na teplotnú rozťažnosť kvapalín. Aby sme mohli tieto vlastnosti pochopiť, musíme vychádzať zo štruktúry kvapalín.

**Kvapaliny** tvoria prechod medzi tuhými látkami a plynmi. Skladajú sa z molekúl, ktoré vykonávajú tepelný pohyb. Dokazujú to napríklad javy difúzie. Ukazuje sa však, že tepelný pohyb molekúl kvapaliny sa výrazne líši od tepelného pohybu molekúl plynu. Je to dôsledok pomerne zložitej štruktúry kvapaliny, ktorá predstavuje stav medzi absolútnym neusporiadaním častíc plynu a pravidelným usporiadaním častíc v ideálnom kryštáli. Usporiadanie molekúl kvapaliny je krátkodosahové a je podobné usporiadaniu častíc v amorfných látkach.

Pod „krátkodosahovým usporiadaním“ rozumieme to, že na malých vzdialenostiach (približne rovnajúcim sa niekoľkým stredným vzdialenostiam medzi susednými molekulami) je usporiadanie molekúl pravidelné, podobne ako v kryštáli. Pri väčších vzdialenostiach sa pravidelnosť stráca.

V kryštáli na rozdiel od kvapaliny je usporiadanie pravidelné aj vo veľkých vzdialenostiach (porovnateľných so stovkami a viac stredných vzdialeností medzi susednými molekulami).

Molekuly kvapaliny neusporiadane kmitajú s vysokou frekvenciou rádovo  $10^{12}$  Hz okolo určitých rovnovážnych polôh (pripomeňme si obr. 2-3 a 2-4) a po veľmi krátkom čase (rádovo ns) zaujímajú novú rovnovážnu polohu. Ak sa zvyšuje teplota kvapaliny, znižuje sa doba, počas ktorej zostáva molekula v rovnovážnej polohe. Navonok sa to prejaví zvýšenou tekutosťou kvapaliny, kvapalina má menšie vnútorné trenie.

Kvapaliny sa na rozdiel od plynov vyznačujú malými vzájomnými vzdialenosťami medzi molekulami – rádovo  $10^{-10}$ m. Tieto vzdialenosti sú približne rovnaké ako v prípade tuhých látok. Preto molekuly kvapaliny pôsobia na seba navzájom značnými silami (pripomeňme si opäť obr. 2-3 a 2-4). Tieto sily majú vplyv na vlastnosti kvapaliny, predovšetkým na vlastnosti jej povrchu.



**Obr. 5-1**  
Prehnutie povrchu vody pod mincou

### 5.1 Povrchová vrstva kvapaliny

Ak položíme na povrch vody tenkú suchú ihlu, žiletku alebo malú mincu, pozorujeme, že sa pod týmito predmetmi povrch vody mierne prehne (obr. 5-1), ale predmety sa nepotopia. Nepotopí sa ani chrobáček – vodomerka prechádzajúci sa po hladine rybníka. Pritom vo všetkých

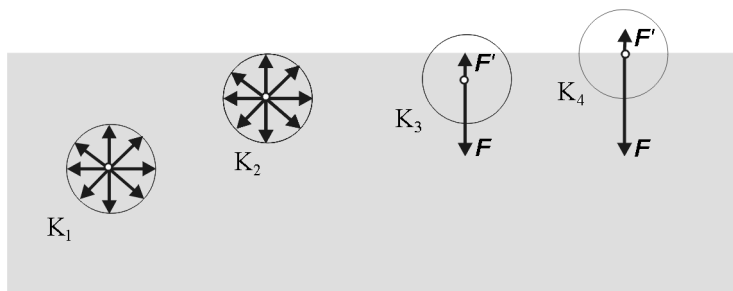
uvedených prípadoch z porovnania hustôt (napríklad hustoty ocele a hustoty vody) by vyplývalo, že by sa mali telesá potopiť.

Určite ste niekedy pozorovali vytváranie kvapky na konci nedostatočne uzavretého vodovodného kohútika. Pozorovali ste, že sa kvapka postupne zväčšuje, potom sa vytvorí zúžený kŕčok, kvapka sa odtrhne a začne sa tvoriť nová kvapka. Vznikajúce kvapky sa správajú ako pružné balóniky v ktorých je voda.

Uvedené príklady a rad ďalších javov nás presvedčajú, že **povrch kvapaliny sa správa ako tenká pružná blana**. Ako si to môžeme vysvetliť?

Na vysvetlenie vlastností povrchu kvapaliny musíme uvažovať pôsobenie medzi molekulami tejto kvapaliny. Molekuly na seba navzájom pôsobia príťažlivými silami, ktorých veľkosť rýchlo klesá s ich rastúcou vzájomnou vzdialenosťou (pripomeňme opäť obr. 2-3 a 2-4). Okolo každej molekuly možno myšlienkovito opísať guľu s takým polomerom  $r_m$  aby sily, ktorými na túto vybranú molekulu pôsobia molekuly ležiace mimo tejto gule, boli zanedbateľné. Túto myšlenú guľu nazývame **sféra molekulového pôsobenia**. Jej polomer je rádovo 1 nm, čo je niekoľko medzimolekulových vzdialeností.

Uvažujme najprv molekulu, ktorej sféra molekulového pôsobenia je vo vnútri kvapaliny. Potom výslednica príťažlivých síl, ktorými molekuly v tejto sfére pôsobia na uvažovanú molekulu, sa rovná nule (obr. 5-2, sféry  $K_1$  a  $K_2$ ). Ku každej molekule sféry možno totiž nájsť molekulu súmerne položenú podľa stredu sféry, ktorá na vybranú molekulu pôsobí rovnako veľkou silou opačného smeru.



**Obr. 5-2** Vzájomné pôsobenie molekúl vo sfére molekulového pôsobenia

V inej situácii sú však molekuly, ktorých vzdialenosť od povrchu kvapaliny je menšia ako  $r_m$  (pozri napr. sféry  $K_3$  a  $K_4$  na obr. 5-2). Výslednica  $F$  príťažlivých síl, ktorými pôsobia molekuly vo sférach typu  $K_3$  alebo  $K_4$  na molekuly v ich stredoch, je kolmá na povrch kvapaliny a má smer dovnútra kvapaliny. Molekuly plynu (najčastejšie molekuly vzduchu alebo pár kvapaliny) v hornej časti uvažovaných sfér pôsobia na molekuly v ich stredoch výslednou príťažlivou silou  $F'$  opačného smeru ako je smer sily  $F$ . Pretože hustota molekúl<sup>1</sup> plynu v hornej časti sféry je oveľa menšia ako hustota molekúl kvapaliny v dolnej časti sféry, má výsledná príťažlivá sila smer dovnútra kvapaliny.

Rovnaká úvaha platí pre všetky molekuly vo vrstve, ktorej vzdialenosť od voľného povrchu kvapaliny je menšia ako polomer  $r_m$  sféry molekulového pôsobenia. Túto vrstvu, ktorá tvorí rozhranie medzi vnútrom kvapaliny a druhým prostredím, nazývame **povrchová vrstva**. Zhrnutím predchádzajúcich úvah dospejeme k záveru:

**Na každú molekulu ležiacu v povrchovej vrstve kvapaliny pôsobia susedné molekuly výslednou príťažlivou silou smerujúcou do kvapaliny.**

Pri posunutí molekuly z vnútra kvapaliny do jej povrchovej vrstvy je potrebné vykonať prácu na prekonanie tejto sily. Preto molekuly v povrchovej vrstve majú väčšiu potenciálnu energiu ako by mali, ak by sa nachádzali vnútri kvapaliny. Túto časť potenciálnej energie, ktorú majú molekuly v povrchovej vrstve navyše v porovnaní s potenciálnou energiou rovnakého počtu molekúl vnútri kvapaliny, nazývame **povrchová energia**. Je jednou zo zložiek vnútornej energie kvapaliny.

Sily smerujúce dovnútra kvapaliny spôsobujú, že kvapalina daného objemu nadobúda taký tvar, aby obsah jej povrchu bol čo najmenší, a tým bola minimálna aj povrchová energia. Pri danom objeme má guľa zo všetkých geometrických telies najmenší obsah povrchu. Preto malé vodné kvapky, napr. hmly, rosy na listoch alebo kvetoch majú guľový tvar. Ak je kvapka väčšia, je jej guľový tvar deformovaný tiažovou silou a reakciou podložky. Ak vykompenzujeme tieto sily, napríklad silou vztlakovou, nadobúdajú guľový tvar aj väčšie kvapky.

<sup>1</sup> Hustota molekúl  $N_V$  (všeobecne hustota častíc) je veličina definovaná vzťahom  $N_V = N/V$ , kde  $N$  je počet molekúl v časti priestoru s objemom  $V$ . Veličinu teda nemožno zamieňať s veličinou hustota látky.

O guľovom tvare kvapiek sa môžeme presvedčiť jednoduchým pokusom: Do vody v skúmavke kvapneme olivový olej a potom pomaly dolievame etylalkohol. Pozorujeme, že sa vytvárajú guľové kvapky oleja, ktoré sa vznášajú v kvapaline.

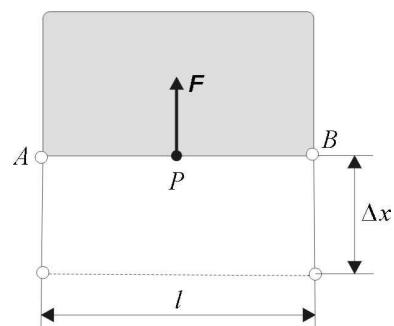
Okolnosť, že kvapalina sa snaží mať taký tvar, aby jej povrch mal čo najmenší obsah môžeme chápať aj tak, že povrchovú vrstvu pokladáme za pružnú blanu, ktorá má snahu sa stiahnuť na plochu s najmenším obsahom. Táto pružná blana, napríklad na vode, na sebe „unesie“ položenú ihlu, ľahkú mincu, žiletku či vodomerku. Kladené predmety nesmú túto blanu porušiť, inak sa potopia. Vyskúšajte.

### Úlohy

1. Rozlomením sklenenej trubičky vzniknú ostré hrany. Tie sa dajú zaobliť zahriatím nad plameňom horáku. Vysvetlite.
2. Aký tvar nadobudnú ľubovoľne veľké kvapky kvapaliny v bezťažovom stave?
3. Prečo je ťažké vyzliecť si mokré oblečenie?

## 5.2 Povrchová sila a povrchové napätie

Skúmajme teraz ďalšie vlastnosti povrchovej vrstvy. Z mydlového roztoku alebo kvapalného saponátu vytvoríme kvapalinovú blanu na drôtenom rámečku, ktorého jedna strana je pohyblivá. Pozorujeme, že sa blana sťahuje a ťahá za sebou i pohyblivú časť  $AB$  rámečka (obr. 5-3).



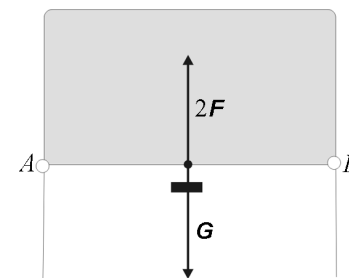
**Obr. 5-3**

Pôsobenie povrchovej sily na pohyblivú priečku  $AB$  v drôtenom rámečku s mydlovou blanou

Prečo je to tak? Na objasnenie využijeme výklad v predchádzajúcom článku. Kvapalinová blana sa snaží zaujať čo najmenší povrch z jednej

i z druhej strany (blana má dva povrchy), aby jej povrchová energia bola minimálna. Pohyblivá priečka rámečka toto sťahovanie umožňuje. Z hľadiska silového pôsobenia môžeme povedať, že na priečku  $AB$  pôsobí v každom bode priečky  $AB$  sila  $2F$  (dva povrchy). Túto silu nazývame **povrchová sila**. Je kolmá na priečku  $AB$  a leží v povrchu kvapalinovej vrstvy (obr. 5-3).

Veľkosť povrchovej sily sa dá určiť experimentálne. Rámček s blanou dáme do zvislej polohy a priečku  $AB$  zaťažíme tak, aby sústava bola v rovnovážnom stave (obr. 5-4). Ak zanedbáme hmotnosť priečky vzhľadom na hmotnosť zaveseného závažia, potom na priečku  $AB$  pôsobí tiaž závažia  $G$  zvislo nadol a výsledná povrchová sila  $2F$  (dva povrchy) zvislo nahor. Pretože je priečka v pokoji,  $F = G/2$ .



**Obr. 5-4**

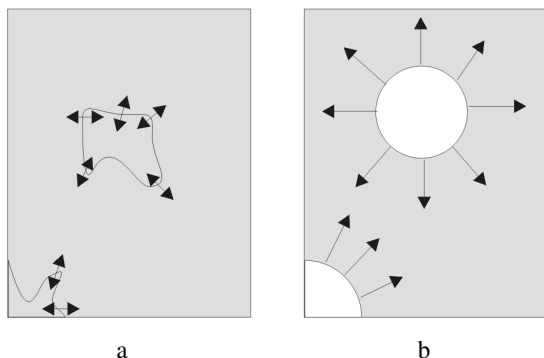
Experimentálne určenie povrchovej sily

Ak je povrch zakrivený (také prípady budeme preberať ďalej), má povrchová sila smer dotyčnice k povrchu kvapaliny v danom bode a je kolmá na okraj kvapaliny.

V opísanom pokuse s kvapalinovou blanou v drôtenom rámečku sme sa zaoberali povrchovou silou pôsobiacou len na pohyblivú časť rámečka – priečku  $AB$ . Povrchová sila ale pôsobí aj na ostatné časti rámečka. Tuhosť týchto častí však neumožňuje, aby sa prejavila. Urobme preto ďalšie pokusy:

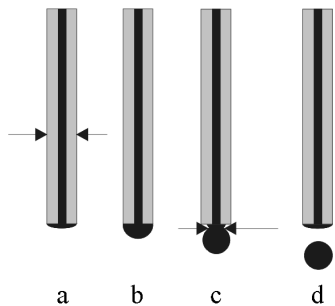
Vytvoríme mydlinovú blanu v tuhom rámečku (obr. 5-5a). Položíme na ňu opatrne navlhčenú slučku z nite. Slučka bude mať nepravidelný tvar, ale keď blanu vnútri slučky pretrhneme, niť sa napne do kruhu (obr. 5-5b). Podobne sa správa niť upevnená v rámečku. Ak pretrhneme blanu medzi niťou a jednou časťou rámečka, napne sa niť do oblúka. Blanu vnútri nite môžeme „roztrhnúť“ aj tak, že do vnútra nite kvapneme odmasťovač na riad.

V prípadoch znázornených na obr. 5-5a povrchové sily pôsobia na každú časť nite z oboch strán, a preto sa navzájom rušia. Ak pretrhneme blanu vnútri slučky, zaniknú povrchové sily vnútri slučky a povrchové sily mimo slučky sú v každom mieste kolmé na niť a smerujú od stredu slučky (obr. 5-5b). Niť sa preto napne.



**Obr. 5-5**  
Pôsobenie povrchových síl na niť položenú na mydlovej blane

Necháme pomaly vytekať vodu otvorom silnostennej kapiláry. Pozorujeme, že sa tvorí kvapka, ktorá sa neustále zväčšuje (obr. 5-6a, b). Tým sa zväčšuje i tiažová sila, ktorá pôsobí na kvapku. Pozdĺž obvodu povrchu blany, ktorý je v styku s kapilárou, pôsobia povrchové sily. Kvapka sa udrží pri otvore, pokiaľ výslednica povrchových síl  $F$  je väčšia ako tiažová sila  $F_G$  kvapky. Ak dôjde k vyrovnaniu oboch síl a nasledujúcemu zväčšeniu veľkosti sily  $F_G$ , kvapka sa odtrhne (obr. 5-6c, d).



**Obr. 5-6**  
Vytváranie kvapiek pri výtoku vody z kapiláry

Vráťme sa ešte raz k pokusu podľa obr. 5-3. Ak vykonáme pokus s rámčekmi, ktoré majú rôznu dĺžku priečky  $AB$ , zistíme, že pre povrchovú vrstvu tej istej kvapaliny je veľkosť povrchovej sily priamo úmerná

dĺžke priečky. Vzťah platí všeobecne pre ľubovoľný okraj povrchovej blany. Tento poznatok využívame na definíciu veličiny **povrchové napätie**:

**Povrchové napätie  $\sigma$  sa rovná podielu veľkosti povrchovej sily  $F$  a dĺžky  $l$  okraja povrchovej blany, na ktorú povrchová sila pôsobí kolmo na povrch kvapaliny.**

Matematicky zapíšeme túto definíciu vzťahom

$$\sigma = \frac{F}{l} \quad (1)$$

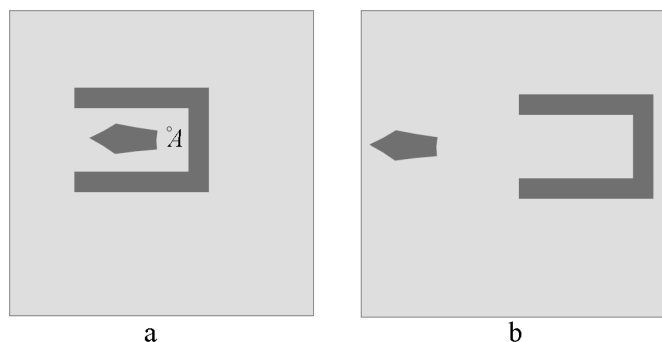
Povrchové napätie kvapaliny voči danému prostrediu je skalárna veličina, ktorou vyjadrujeme pružnú vlastnosť povrchovej vrstvy. Zo vzťahu (1) vyplýva, že jednotkou povrchového napätia je  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ . Často sa používa menšia jednotka  $\text{mN} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Povrchové napätie závisí od druhu kvapaliny a od prostredia nad povrchom kvapaliny. S rastúcou teplotou povrchové napätie kvapaliny voči danému prostrediu klesá. Pre niektoré kvapaliny sú hodnoty  $\sigma$  uvedené v tabuľkách (pri teplote  $20^\circ\text{C}$ ). Napríklad pre čistú vodu v styku so vzduchom  $\sigma = 73 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ . Povrchové napätie vody v styku s parafínovým olejom je  $38 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ . Povrchové napätie etanolu v styku so vzduchom je  $22 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Rôzne hodnoty povrchového napätia rôznych kvapalín (v styku so vzduchom) možno ukázať napríklad nasledujúcim pokusom: Z tenkej lepenky alebo pohľadnice vystrihneme obrazce znázornené na obr. 5.7a. Na chvíľu ich ponoríme do roztaveného vosku a potom vyberieme. Po stuhnutí vosku ich položíme na vodnú hladinu a usporiadame do zostavy ako na obr. 5-7a. Koncom drôtu omočeným v saponátovom roztoku sa dotkneme povrchu vody v mieste A. Menší obrazec vyletí ako strela z vnútra veľkého obrazca, ktorý sa trochu posunie na opačnú stranu (obr. 5-7b). Ako tento úkaz vysvetlíme?

V mieste, kam sme kvapli saponát, sa zmenšila povrchová sila pôsobiaca na obrazce (vymedzujúca okraje povrchovej vrstvy vody). Preto výslednice povrchových síl smerujú pri malom obrazci vľavo, v prípade väčšieho vpravo. Z toho usudzujeme, že povrchové napätie saponátu je menšie ako povrchové napätie vody.

Pridaním saponátu, prášku na pranie, či mydla do vody sa zníži povrchové napätie vody. Voda potom lepšie zmáča vlákna i nečistotu. Ľahšie preniká do medzier medzi nimi a umožňuje oddelenie nečistoty.



Obr. 5-7 Pokus k nerovným hodnotám povrchového napätia rôznych kvapalín

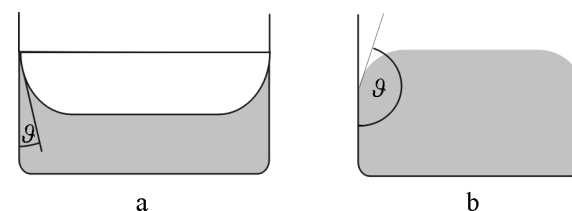
### Úlohy

- Položte na vodnú hladinu slučku z nite potretej tenkou vrstvičkou tuku. Potom opatrne kvapnite trochu saponátu alebo liehu do slučky. Opíšte pozorovaný jav a vysvetlite ho.
- Pohyblivá priečka dĺžky 50 mm v rámečku s mydlovou blanou vo zvislej polohe (obr. 5-4) je v rovnovážnom stave, ak je zaťažená závažím s hmotnosťou 400 mg. Vypočítajte:
  - veľkosť povrchovej sily pôsobiacej na priečku v jednom povrchu,
  - prírastok povrchovej energie oboch strán blany keď priečku posunieme z rovnovážnej polohy po dráhe 2,0 cm. Hmotnosť priečky neuvažujte. (Návod: vypočítajte prácu vonkajšej sily pri posunutí priečky.) [a) 2 mN; b) 80  $\mu$ J]
- Prečo stan alebo dáždnik neprepúšťa vodu napriek tomu, že v látke, z ktorej sú vyrobené, sú malé otvory? Dá sa voda prenášať i v cedidle? Ako to urobíte?
- Ak sa má vyčistiť benzínom na látke masťná škvrna, odporúča sa najprv navlhčiť benzínom okolie škvŕny a až potom nakvapkať benzín na masťnú škvrnu a vysušiť ju. Ako zdôvodníte tento postup ak viete, že benzín s rozpusteným tukom má väčšie povrchové napätie ako čistý benzín?
- Prečo sa rozpustený tuk na povrchu polievky neroztečie, ale pláva na nej v tvare krúžkov.
- Na vodnú hladinu položte 6 až 8 zápaličiek, ktoré sa pokúste usporiadať do hviezdy s voľným stredom. Potom sa vody v tomto strede ľahko dotknite kúskom mydla. Opíšte čo pozorujete a jav vysvetlite.

- Z úzkej hrubostennej kapiláry odkvapkalo 100 kvapiek vody s celkovou hmotnosťou 5,0 g. Rovnakou kapilárou pri rovnakej teplote odkvapkalo 50 kvapiek glycerínu celkovej hmotnosti 2,0 g. Aký je pomer povrchových napätí oboch kvapalín pri rovnakej teplote? Dal by sa opísaný pokus využiť na určenie povrchového napätia neznámej kvapaliny? Ak áno, navrhните postup merania. [5 : 4]

### \*5.3 Javy na rozhraní tuhého telesa a kvapaliny

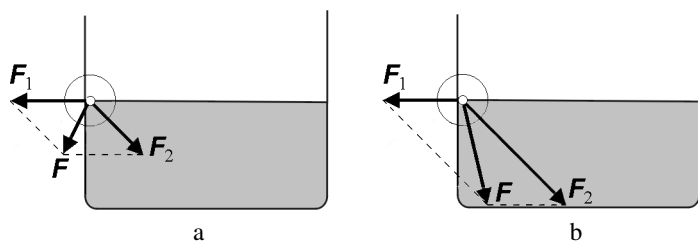
Ak nalejeme do čistého pohára vodu, pozorujeme pri stene dutý povrch (obr. 5-8a). Dutý povrch tiež vytvára lieh v sklenenej nádobe alebo ortuť v nádobe z medi. V týchto prípadoch hovoríme, že **kvapalina zmáča steny nádoby**. Ak nalejeme do čistej sklenenej nádoby ortuť, je pri stene zakrivená vypuklo (obr. 5-8b). Podobne sa v pohári správa roz-tavený vosk. V týchto prípadoch **kvapalina nezmáča steny nádoby**.



Obr. 5-8 Zakrivenie povrchu kvapaliny pri stenách nádoby

Zakrivenie povrchu kvapaliny pri stene nádoby vysvetlíme pomocou obr. 5-9. Znázorníme sféru molekulového pôsobenia pre molekulu kvapaliny ležiacu na rozhraní kvapaliny, steny nádoby a vzduchu. Častice steny nádoby obsiahnuté v ľavej polovici sféry pôsobia na zvolenú molekulu vzduchu príťažlivou silou  $F_1$  kolmo na stenu. Molekuly kvapaliny v pravej dolnej štvrtine sféry pôsobia na uvažovanú molekulu výslednou príťažlivou silou  $F_2$  smerujúcou dovnútra kvapaliny. Molekuly vzduchu v pravej hornej štvrtine sféry pôsobia na uvažovanú molekulu výslednou príťažlivou silou  $F_3$ . Na molekulu tiež pôsobí tiažová sila  $F_G$ . Veľkosti síl  $F_3$  a  $F_G$  sú v porovnaní s veľkosťami síl  $F_1$  a  $F_2$  malé, preto ich pre jednoduchosť výkladu zanedbáme. Na obrázku 5-9 už nie sú znázornené. Uvažujeme teda len výslednicu síl  $F = F_1 + F_2$ . Podobné úvahy platia i pre molekuly ležiace v blízkom okolí zvolenej molekuly.

Teraz trocha odbočíme. Všetci vieme, že ustálená hladina vody v nádobe je „vodorovná“. (Na tomto princípe funguje aj vodováha, ktorú používajú stavbári.) Hladina vody je vodorovná preto, že na určitú molekulu na povrchu vody pôsobí niekoľko síl, ktoré môžu byť v rovnováhe len vtedy, keď je hladina vodorovná. Prvou z nich je gravitačná sila, ktorej smer je priamo dolu, druhou je tlak molekúl, ktoré sa nachádzajú pod našou vybranou molekulou, treťou je príťažlivá sila od molekúl, ktoré sa nachádzajú tesne pod našou vybranou molekulou. Druhá a tretia sila sú kolmé na hladinu vody v danom mieste. Ak hladina vody nie je kolmá na gravitačnú silu, všetky tri spomínané sily sa nemôžu zložiť na nulovú výslednicu a naša vybraná molekula sa musí pohnúť (spolu so svojimi susedkami). A bude sa hýbať tak dlho, kým hladina vody nebude kolmá na výslednicu vonkajších síl. V tomto prípade bola vonkajšou silou len gravitácia. Teraz sa vrátíme k situácii na obr. 5-9. a budeme uvažovať molekulu pri okraji nádoby, na ktorú pôsobí výsledná sila  $F$ . Aj v tomto prípade musí byť v ustálenom stave povrch kvapaliny v danom mieste kolmý na silu  $F$ .



Obr. 5-9 K výkladu vzniku zakrivenia povrchu kvapaliny pri stenách nádoby

Ak sila  $F$  smeruje von z kvapaliny (obr. 5-9a), potom povrch kvapaliny pri stene musí byť dutý, aby bol kolmý na túto silu (obr. 5-8a). Inak by nastal pohyb molekúl v povrchovej vrstve kvapaliny. Ak sila  $F$  smeruje dovnútra kvapaliny (obr. 5-9b), potom povrch je vypuklý (obr. 5-8b). Ak by výslednica  $F$  ležala na povrchu steny nádoby, bol by povrch rovný.

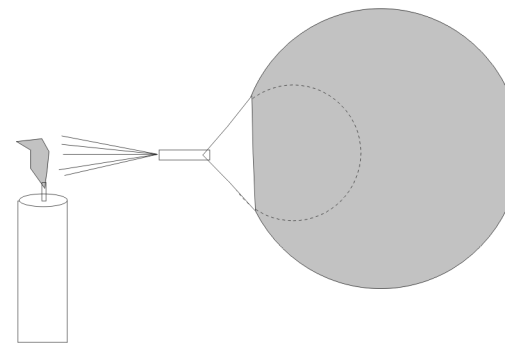
Uhol  $\vartheta$ , ktorý zvierá povrch kvapaliny s povrchom steny, nazývame **stykový uhol** (obr. 5-8). Ak  $\vartheta = 0^\circ$ , kvapalina dokonale zmáča steny. Pre dokonale nezmáčajúce kvapaliny  $\vartheta = \pi$ . Pre skutočné kvapaliny je  $0 < \vartheta < \pi/2$  alebo  $\pi/2 < \vartheta < \pi$ . Pre vodu v čistej sklenenej nádobe  $\vartheta = 8^\circ$ ,

pre ortuť v sklenenej nádobe  $\vartheta = 128^\circ$ . Ak  $\vartheta = \pi/2$ , je povrch nezakrivený.

Pod zakriveným povrchom kvapaliny pri stenách nádoby, v kapilárach, pri kvapkách a bublinách vzniká v kvapaline prídavný tlak, ktorý je spôsobený pružnosťou povrchovej vrstvy. Tento tlak sa nazýva **kapilárny tlak**.

**Pod dutým povrchom kvapaliny je vnútorný tlak v porovnaní s tlakom pod otvoreným povrchom menší o kapilárny tlak. Pod vypuklým povrchom kvapaliny je naopak vnútorný tlak v porovnaní s tlakom pod vodorovným povrchom väčší o kapilárny tlak.**

O existencii kapilárneho tlaku napr. v mydlovej bubline sa presvedčíme nasledujúcim pokusom: Vyfúkame na lieviku mydlovú bublinu a potom ústie lievika priblížime k plameňu sviečky (obr. 5-10). Pozorujeme, že plameň sviečky sa odkláňa od ústia lievika. Vzduch je z bubliny vytlačovaný, čo svedčí o tom, že vnútri bubliny je väčší tlak, ako je tlak okolitého vzduchu.



Obr. 5-10 Schéma pokusu na demonštráciu kapilárneho tlaku

V prípade guľovej bubliny kapilárny tlak s klesajúcim polomerom rastie. Presvedčíme sa o tom nasledujúcim pokusom:

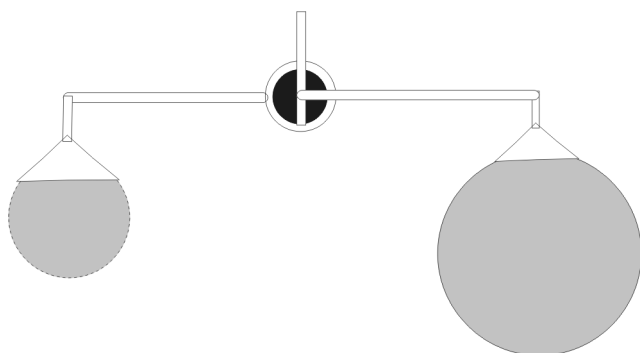
Na koncoch sklenenej trubičky vybavenej uprostred trojcestným kohútikom postupne vyfúkame dve mydlové bubliny s rôznymi polermi (obr. 5-11). Ak potom otvoríme kohútik tak, aby boli obe bubliny prepojené trubičkou, začne rásť bublina s väčším polomerom. Menšia bublina sa znižuje až zanikne. To znamená, že na začiatku deja je väčší kapilárny tlak v bubline s menším polomerom.

Z merania i teórie vyplýva, že ak má povrch kvapaliny tvar guľového vrcholíka (resp. gule, napr. v prípade kvapky alebo bubliny), je kapilárny tlak  $p_k$  daný vzťahom

$$p_k = \frac{2\sigma}{R} \quad (2)$$

kde  $\sigma$  je povrchové napätie kvapaliny a  $R$  polomer guľového povrchu. V prípade tenkej guľovej bubliny s dvomi povrchmi (napríklad mydlovej bubliny) s polomerom  $R$  pre kapilárny tlak platí

$$p_k = \frac{4\sigma}{R} \quad (3)$$



**Obr. 5-11** Pokus na overenie závislosti kapilárneho tlaku od polomeru mydlovej bubliny

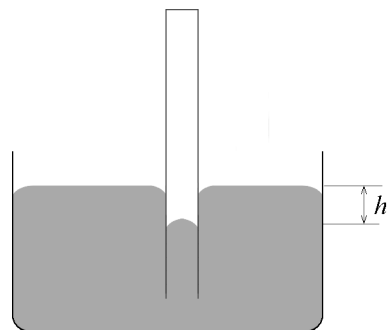
### Úlohy

1. Uveďte zo svojho okolia príklady zmáčania a nezmáčania tuhých telies kvapalinou.
2. Prečo sa nedá písať atramentom na mastný papier? Prečo sa na niektorých druhoch papiera rozpíja písmo?
3. Postavte pohár na tanier a jeho okraj utrite suchou látkou. Do pohára nalievajte vodu tak dlho, pokiaľ nie je plná až po okraj. Teraz púšťajte do vody zvislo po hrane mince alebo drobné kovové predmety (klince, špendlíky, kancelárske sponky). Overte, že do vody môžeme vhodiť pomerne veľký počet uvedených predmetov, bez toho, aby voda pretiekla. Opíšte tvar povrchu vody a jav vysvetlite.

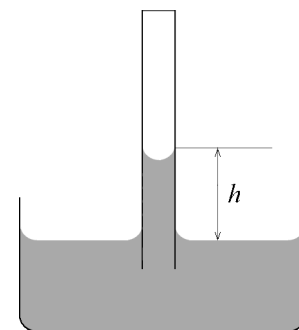
4. Vyberte dve slamky ktoré sa dajú do seba zasunúť. Na každej slamke vyfúknite mydlovú bublinu tak, aby bubliny mali rôzne polomery. Potom slamky do seba zasunúť koncami, na ktorých nie sú bubliny. Opíšte a vysvetlite pozorovaný jav.
5. Aký tlak má vzduch v guľovej bubline s priemerom  $1 \mu\text{m}$  v hĺbke  $5,0 \text{ m}$  pod hladinou vody, ak je atmosférický tlak  $1\,000 \text{ hPa}$ ? Povrchové napätie vody v styku so vzduchom je  $73 \text{ mN} \cdot \text{m}^{-1}$ .

## 5.4 Kapilárne javy

Ak ponoríme trubicu s malým vnútorným priemerom (kapiláru, spravidla s priemerom menším ako  $1 \text{ mm}$ ) zvislo do kvapaliny v širokej nádobe, pozorujeme zakrivenie povrchu kvapaliny v trubici a jej vzostup alebo zníženie vzhľadom na hladinu kvapaliny v nádobe. Pri kvapalinách, ktoré zmáčajú steny trubice, sa vytvorí v trubici dutý vrcholík, ktorý je vyššie ako hladina okolitej kvapaliny (obr. 5-12), nastala **kapilárna elevácia** (z lat. elevo – zdvíham, capillus – vlas). V prípade kvapalín, ktoré nezmáčajú steny nádoby, vytvorí hladina v trubici vypuklý vrcholík ktorý je nižšie ako hladina okolitej kvapaliny (obr. 5-13). Jav sa nazýva **kapilárna depresia** (z lat. deprimio – stláčam).



**Obr. 5-12** Kapilárna elevácia



**Obr. 5-13** Kapilárna depresia

Ako tieto javy vysvetliť? Zmeny výšky hladiny v kapiláre sú spojené s existenciou kapilárneho tlaku. Tesne pod dutým povrchom je vnútorný tlak nižší než tesne pod rovinným povrchom kvapaliny v okolí kapiláry, a to o kapilárny tlak. Kvapalina preto vystúpi v kapiláre až do takej výšky  $h$

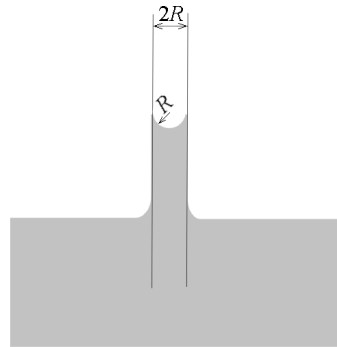
(obr. 5-12), aby hydrostatický tlak zodpovedajúci tomuto stĺpcu kvapaliny vyrovnal rozdiel vnútorných tlakov.

Pri kapilárnej depresii je to opačne. Tesne pod vypuklým povrchom v kapiláre je vnútorný tlak väčší ako tesne pod rovinným povrchom kvapaliny v okolí kapiláry, a to o kapilárny tlak. Preto kvapalina klesne v kapiláre o takú výšku  $h'$  (obr. 5-13), aby bol kapilárny tlak kompenzovaný.

Na základe tohto výkladu môžeme vypočítať napríklad výšku  $h$  pri kapilárnej elevácii. Ak má kvapalina hustotu  $\rho$ , potom hydrostatický tlak zodpovedajúci výške  $h$  sa rovná  $h\rho g$ . Ak je vytvorený dutý povrch tvaru pologule s polomerom  $R$  (teda keď kvapalina dokonale zmáča kapiláru,  $R$  je aj polomer kapiláry, obr. 5-14), sa podľa vzťahu (2) kapilárny tlak rovná  $2\sigma/R$ . Z rovnosti tlakov  $h\rho g = 2\sigma/R$  dostaneme pre výšku  $h$  pri kapilárnej elevácii vzťah

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R} \quad (4)$$

Zo vzťahu (4) vidno, že zvýšenie hladiny v kapiláre vzhľadom na rovinný povrch vo vonkajšej nádobe je nepriamo úmerné polomeru kapiláry. Pri danom polomere kapiláry je výška  $h$  tým väčšia, čím väčšie má kvapalina povrchové napätie.



**Obr. 5-14**

K výpočtu výšky pri kapilárnej elevácii

Rovnaké úvahy platia pre kapilárnu depresiu a vzťah pre zníženie hladiny je analogický vzťahu (4).

Kapilárna elevácia a kapilárna depresia patria medzi základné **kapilárne javy**. Ďalej medzi tieto javy patrí zakrivenie povrchu kvapaliny pri stene nádoby, tvorba kvapiek, bubliniek, peny a ďalšie.

Kapilárne javy vysvetľujú schopnosť celého radu látok, napr. vaty knôtu, pôdy, betónu, vstrebávať (nasávať) vlhkosť. Pre zachovanie spodnej vlhkosti v pôde sa v nej orbou alebo okopávaním rozrušujú kapiláry, inak voda kapilármi stúpa hore (vzlína) a vyparuje sa. Naopak stláčaním pôdy, napr. valcovaním, sa kapiláry v pôde vytvárajú. To umožňuje vzlínanie vody k povrchu so zasiatými semenami.

Aby vlhkosť neprenikala do obytných priestorov kapilármi, izolujú sa ako základy budovy, tak aj ich steny vodotesnými materiálmi, ktoré zabraňujú kapilárnym javom. Na vytvorenie dokonalého spoja spájkovaných súčastí sa využíva vzlínavosť roztavenej spájky v tenučkých špárach.

## Úlohy

1. Ak položíme kúsok kriedy na vlhkú hubku, krieda navlhne. Ak však položíme suchú hubku na vlhkú kriedu, zostane hubka suchá. Ako to vysvetlíte?
2. Navrhnete a potom vykonajte pokus, ktorým dokážete závislosť výšky pri kapilárnej elevácii od polomeru kapiláry.
3. Prečo lekársky ortuťový teplomer nereaguje na zníženie teploty? (Návod: uvážte vplyv zúženého miesta na uplatnenie kapilárnej depresie.)
4. Vypočítajte povrchové napätie benzínu v styku so vzduchom ak v kapiláre s vnútorným priemerom 0,40 mm vystúpi benzín do výšky 3,0 cm nad hladinu benzínu v širšej nádobe. Hustota benzínu je  $700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Predpokladajte dokonalé zmáčanie, tiažové zrýchlenie voľte  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ . [21 mN · m<sup>-1</sup>]

## \*5.5 Teplotná objemová rozťažnosť kvapalín

Pokusom možno dokázať, že pri zmene teploty kvapaliny sa mení jej objem. Jav sa nazýva teplotná objemová rozťažnosť kvapaliny. Pri väčšine kvapalín ich objem rastie s rastúcou teplotou. Pritom rôzne kvapaliny sa za inak rovnakých podmienok rozťahujú rôzne.

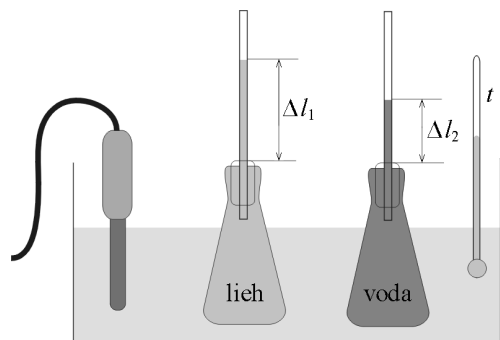
Pokusom podľa usporiadania na obr. 5-15 overíme, že dve rôzne kvapaliny sa s rastúcou teplotou rozťahujú rôzne. Jednu banku naplníme



napr. petrolejom, druhú liehom rovnakej začiatočnej teploty a uzavrieme ich zabrúseným nadstavcom s kapilárou tak, aby v bankách nezostali vzduchové bubliny. Banky vložíme do vodného kúpeľa a označíme začiatočné polohy hladín v kapilárach. Ak zvyšujeme teplotu vodného kúpeľa, pozorujeme zmeny objemu jednej i druhej kvapaliny pomocou zmien dĺžok  $\Delta l_1$  a  $\Delta l_2$  kvapalinového stĺpca (obr. 5-15) v kapilárach. Zistíme, že lieh sa rozťahuje viac ako petrolej. Pozorované zmeny objemu kvapalín sú ale relatívne, pretože sa rozťahujú aj banky. Z merania vyplýva, že pre nie veľmi veľké teplotné rozdiely je objem  $V$  kvapaliny pri stálom vonkajšom tlaku určený približne vzťahom

$$V \approx V_1(1 + \beta\Delta t) \quad (5)$$

kde  $\Delta t = t - t_1$  je zmena teploty,  $V_1$  začiatočný objem kvapaliny pri začiatočnej teplote  $t_1$  a  $\beta$  **teplotný súčiniteľ objemovej rozťažnosti kvapaliny**. Pre niektoré kvapaliny sú hodnoty  $\beta$  uvedené v tabuľkách. Napríklad pri teplote 20 °C pre vodu  $\beta = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , pre petrolej  $9,6 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ , pre etanol  $11 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Teplotný súčiniteľ objemovej rozťažnosti je všeobecne väčší pri kvapalinách ako pri tuhých látkach.



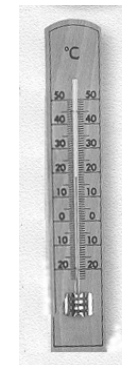
**Obr. 5-15** Pokus k teplotnej objemovej rozťažnosti dvoch rôznych kvapalín

Pre väčšie teplotné rozdiely vyjadrujeme objem  $V$  kvapaliny v závislosti od teplotnej zmeny  $\Delta t$  kvadratickým vzťahom

$$V = V_1(1 + \beta_1\Delta t + \beta_2(\Delta t)^2) \quad (6)$$

Napríklad pre ortuť  $\beta_1 = 1,82 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ,  $\beta_2 = 8 \cdot 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ .

Teplotná objemová rozťažnosť sa využíva v **kvapalinových teplomeroch**. S meniacou sa teplotou sa mení objem kvapaliny (napr. ortuť, zafarbeného liehu) v tenkej trubici napojenej na nádobku teplomera (obr. 5-16). Kvapalinový stĺpec mení svoju výšku a z polohy jeho horného konca odčítame príslušnú teplotu. Na meranie teploty pri rôznych podmienkach a okolnostiach používame kvapalinové teplomery s rôznymi meracími rozsahmi a s rôznym delením teplotnej stupnice.



**Obr. 5-16**  
Kvapalinový teplomer

Teplotná objemová rozťažnosť sa tiež používa v termostatických ventiloch, ktoré pri teplovodných radiátoroch ústredného alebo diaľkového vykurovania automaticky regulujú prítok teplej vody podľa vonkajšej teploty, a tým výrazne znižujú náklady na dodávanú energiu. V hlavici termostatického ventilu je špeciálna kvapalina s vysokým teplotným súčiniteľom objemovej rozťažnosti. So zvyšujúcou sa teplotou v okolí sa zväčšuje objem kvapaliny, čo vyvolá vznik tlakovej sily. Táto sila sa vhodným mechanizmom prenáša na kužel uzatvárajúci prítok teplej vody. Kužel sa zasunie do potrubia a prítok teplej vody sa zmenší. Ak naopak vonkajšia teplota príliš poklesne, kvapalina zmenší objem, kužel sa povytiahne z potrubia a prítok teplej vody do radiátora sa zväčší.

So zmenou teploty kvapaliny sa mení tiež jej **hustota**. Ak je  $\rho_1$  hustota kvapaliny pri začiatočnej teplote  $t_1$ , potom hustota  $\rho$  pri teplote  $t$  je daná približným vzťahom

$$\rho \approx \rho_1(1 - \beta\Delta t) \quad (7)$$

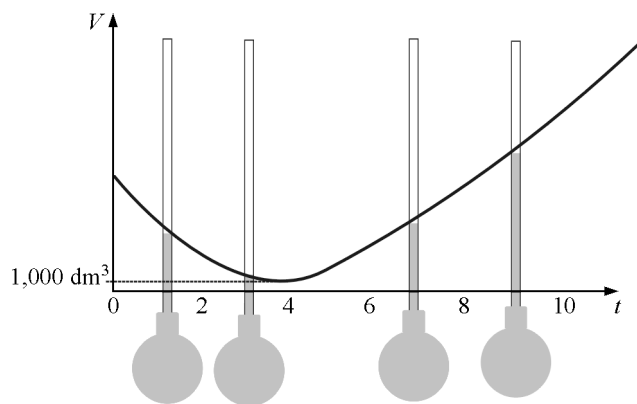
kde  $\Delta t = t - t_1$  je zmena teploty a  $\beta$  teplotný súčiniteľ objemovej rozťažnosti danej kvapaliny.

Koeficient  $\beta$  v rovniciach (5) a (7) je ten istý koeficient objemovej rozťažnosti kvapaliny a znamienka sú v oboch prípadoch správne. Hustota kvapaliny je rovná podielu hmotnosti istého množstva kvapaliny a objemu tohto množstva. Ak sa zväčší objem kvapaliny pribudne v menovateli výraz  $(1 + \beta\Delta t)$ . Potom už stačí využiť približný vzťah

$$\frac{1}{1 + \beta\Delta t} \approx 1 - \beta\Delta t$$

ktorý platí dosť presne pri hodnotách súčinu  $\beta\Delta t$  menších ako 0,01. Ak tento trik nepoznáte, netrúpte sa a overte si to experimentálne kalkulačkou.

Voda je medzi kvapalinami výnimkou z hľadiska závislosti objemu od teploty. Ak zahrievame vodu z teploty 0 °C na teplotu 4 °C, jej objem sa znižuje. Až od teploty 4 °C (presnejšie 3,98 °C) sa voda správa ako ostatné kvapaliny, t. j. s rastúcou teplotou sa jej objem zväčšuje. Pri teplote okolo 8 °C má ten istý objem ako pri 0 °C. Ak zostrojíme pre vodu danej hmotnosti graf závislosti jej objemu od teploty, dostaneme krivku, ktorá je na obr. 5-17.



**Obr. 5-17**  
Graf závislosti objemu vody s hmotnosťou 1 kg od teploty

Zo závislosti objemu vody od teploty tiež vyplýva, že hustota vody sa od teploty 0 °C do 4 °C zväčšuje a až nad touto teplotou sa znižuje. Táto

odlišná zmena hustoty vody so zmenou teploty v porovnaní s ostatnými kvapalinami sa nazýva **anomália vody**.

Anomália vody je spôsobená tým, že pri 4 °C sú medzi molekulami vody najmenšie stredné vzdialenosti a hustota vody je vtedy najväčšia. Podrobná analýza tohto javu je veľmi zložitá a nebudeme sa o ňu pokúšať.

Anomália vody umožňuje život vodných živočíchov a rastlín v zimnom období. V tomto období, keď zamrzajú hladiny rybníkov, jazier alebo riek, má voda pri dne teplotu približne 4 °C.

## Úlohy

1. Uveďte príklady z praxe, kde je potrebné počítať s teplotnou rozťažnosťou kvapalín a kedy sa tento jav využíva.
2. Vyberte konkrétny plyn, tuhé teleso a kvapalinu rovnakého začiatočného objemu  $V_1$  a začiatočnej teploty. Vypočítajte relatívnu zmenu objemu  $\Delta V/V_1$  pre každé teleso pri zmene teploty o 50 K. Získané hodnoty porovnajte a vyslovte záver pre teplotnú rozťažnosť telies rôznych skupenstiev.
3. Oceľový sud s vnútorným objemom 100 litrov je naplnený petrolejom až po okraj. Aký objem má petrolej, ktorý vytečie zo suda, keď sa teplota sústavy zvýši o 40 K? Pri riešení použite vzťah (5). Ostatné potrebné údaje vyhľadajte. [3,7 litrov]
4. Vo vode pri teplote 10 °C pláva teleso tak, že je celé ponorené. Bude teleso plávať ak vodu zahrejeme?
5. Pri teplote 20 °C má ortuť hustotu  $13\,546 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Akú má hustotu pri teplotách 0 °C a 100 °C? V danom teplotnom intervale  $\beta = 1,818 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . [ $1,359 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $1,335 \cdot 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

## Zhrnutie učiva kapitoly 5

**Kvapalina** tvorí prechod medzi tuhú a plynnou látkou. Skladá sa z molekúl, ktoré vykonávajú tepelný pohyb. Usporiadanie molekúl je krátkodosahové. Každá molekula kmitá okolo svojej rovnovážnej polohy za čas rádovo 1 ns a potom zaujme novú rovnovážnu polohu. Stredné vzdialenosti molekúl sú rádovo 0,1 nm. Preto na seba molekuly navzájom pôsobia značnými príťažlivými silami. Tieto sily sa prejavujú predovšetkým v povrchovej vrstve kvapaliny.

**Povrchová vrstva kvapaliny** je vrstva molekúl kvapaliny, ktorých vzdialenosť od povrchu kvapaliny je menšia ako polomer sféry molekulového pôsobenia. **Sféra molekulového pôsobenia** je myslená guľa

opísaná okolo zvolenej molekuly a má taký polomer, že sily, ktorými na túto molekulu pôsobia molekuly ležiace mimo tejto gule, sú už zanedbateľné. Na každú molekulu, ktorá leží v povrchovej vrstve, pôsobia susedné molekuly výslednou príťažlivou silou, ktorá smeruje dovnútra kvapaliny.

Povrchová vrstva má **povrchovú energiu**. Rovná sa rozdielu potenciálnej energie molekúl kvapaliny v povrchovej vrstve a potenciálnej energie tých istých molekúl, ak by boli vnútri kvapaliny.

Na okraj povrchovej blany pôsobia molekuly kvapaliny **povrchovou silou**, ktorá je kolmá na tento okraj a ktorej smer leží na povrchu kvapaliny (ak je rovinný), resp. v dotyčnicovej rovine k povrchu kvapaliny (ak je zakrivený).

Podiel veľkosti povrchovej sily  $F$  a dĺžky  $l$  okraja povrchovej blany je povrchové napätie  $\sigma$ . Platí

$$\sigma = \frac{F}{l}$$

Jednotkou povrchového napätia je  $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ .

Kvapalina zmáčajúca povrch steny nádoby vytvára pri tejto stene dutý povrch. Kvapalina **nezmáčajúca povrch steny nádoby** má pri stene vypuklý povrch. Pod zakriveným povrchom kvapaliny je **kapilárny tlak**. V prípade dutého povrchu znižuje vnútorný tlak, pri vypuklom povrchu zvyšuje tento tlak. Pri guľovej bubline je kapilárny tlak tým väčší, čím menší je polomer tejto bubliny.

Ak má povrch kvapaliny tvar guľového vrcholíka (resp. gule, napríklad pri kvapke alebo bubline), je kapilárny tlak  $p_k$  daný vzťahom

$$p_k = \frac{2\sigma}{R}$$

kde  $R$  je polomer guľového povrchu.

Pri tenkej guľovej bubline s dvomi povrchmi (napr. pri mydlovej bubline) s polomerom  $R$  pre kapilárny tlak platí

$$p_k = \frac{4\sigma}{R}$$

V dôsledku kapilárneho tlaku pozorujeme v kapilárach **kapilárnu eleváciu**, ak kvapalina zmáča vnútorný povrch kapiláry, alebo **kapilárnu depresiu** pri kvapalinách nezmáčajúcich kapiláru.

Pre výšku  $h$  pri kapilárnej elevácii (alebo depresii) platí vzťah

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R}$$

kde  $\rho$  je hustota kvapaliny a  $R$  polomer kapiláry.

Objem kvapaliny sa mení s teplotou podľa vzťahu (pre nie veľmi veľké teplotné intervaly)

$$V = V_1(1 + \beta\Delta t)$$

hustota kvapaliny podľa vzťahu

$$\rho \approx \rho_1(1 - \beta\Delta t)$$

kde  $\beta$  je **teplotný súčiniteľ objemovej rozťažnosti kvapaliny**.

Hustota vody v intervale  $0^\circ\text{C}$  až  $4^\circ\text{C}$  sa zväčšuje, pri teplote  $4^\circ\text{C}$  dosahuje maximum a potom klesá. Tento jav sa nazýva **anomália vody**.