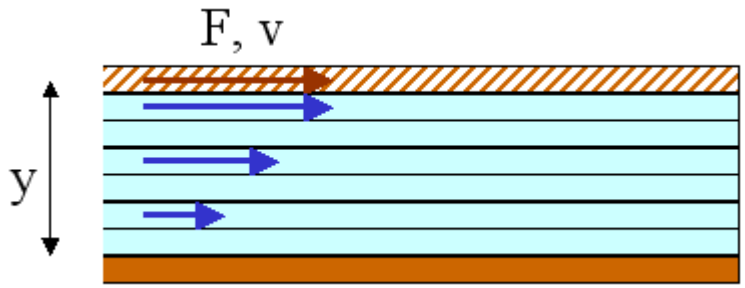
VISKOZITA KVAPALÍN

Pri štúdiu zákonitostí prúdenia kvapalín je vhodné zaviesť predstavu ideálnej (dokonalej) kvapaliny. Ideálna kvapalina je úplne nestlačiteľná a dokonale tekutá. Tekutosť skutočných (reálnych) kvapalín nie je dokonalá a je pre rôzne kvapaliny rôzna, napr. glycerín tečie za rovnakých podmienok pomalšie ako voda. Príčinou nedokonalej tekutosti kvapalín je ich vnútorné trenie, čiže silové pôsobenie jednotlivých vrstiev prúdiacej kvapaliny proti ich vzájomnému pohybu. Názov vnútorné trenie vychádza zo skutočnosti, že tento jav je podobný treniu pri pohybe tuhých telies. V reálnych kvapalinách však k treniu nedochádza na povrchu ale vo vnútri kvapalín. Prejavuje sa pri prúdení kvapaliny alebo pri pohybe telesa v kvapaline. **Viskozita** je fyzikálna veličina, ktorá charakterizuje vnútorné trenie kvapaliny. Čím väčšia je viskozita kvapaliny, tým viac je brzdené jej prúdenie a tým viac je brzdený pohyb telesa v takejto kvapaline.

Pojem viskozita je možné vysvetliť na pokuse podľa obrázka.1. Kvapalina je umiestnená v priestore medzi dvoma hladkými rovnobežnými platňami. Vzdialenosť medzi platňami je označená písmenom **y**. Spodná platňa je nepohyblivá, vrchná platňa sa pohybuje rýchlosťou **v** v smere zľava doprava. Na rozhraní tuhá látka - kvapalina je tenká vrstva kvapaliny pevne prichytená adhéznymi silami k povrchu platne. V blízkosti spodnej platne je preto rýchlosť kvapaliny nulová a v blízkosti hornej platne je rovná rýchlosti pohybu dosky **v**. Pôsobením vnútorného trenia sa kvapalina rozdelí na jednotlivé vrstvy, ktorých rýchlosť lineárne klesá v smere zhora nadol, ako je naznačené na obrázku.



Obrázok 1: Rozdelenie rýchlosti v reálnej kvapaline, keď spodná doska je nepohyblivá a vrchná doska sa pohybuje rýchlosťou v.

Aby sa udržoval rovnomerný pohyb, musí na hornú dosku pôsobiť tangenciálna sila **F**, ktorá prekonáva vnútorné trenie v kvapaline. Pri malej rýchlosti **v** a malej hrúbke kvapaliny **y** je sila **F** určená vzťahom

$$F = \eta \cdot S \cdot \frac{v}{y} \qquad (1)$$

kde **S** je plocha pohyblivej platne. Koeficient úmernosti **η** sa nazýva koeficient dynamickej viskozity alebo krátko **dynamická viskozita**. Zo vzťahu (1) vyplýva, že dynamická viskozita sa udáva v jednotkách

$$[\eta] = \frac{[F]}{[S]} \cdot \frac{[y]}{[v]} = \frac{N}{m^2} \cdot \frac{m}{m \cdot s^{-1}} = Pa \cdot s$$

kde Pa (pascal) je jednotka tlaku, 1Pa=N/m^2.

Prevrátená hodnota viskozity sa označuje ako tekutosť **φ**

$$\varphi = \frac{1}{\eta}. \qquad (2)$$

Podiel dynamickej viskozity **η** kvapaliny a jej hustoty **ρ** definuje **kinematickú viskozitu ν**

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \qquad (3)$$

ktorá sa udáva v jednotkách

$$[\nu] = \frac{[\eta]}{[\rho]} = \frac{Pa \cdot s}{kg \cdot m^{-3}} = m^2 \cdot s^{-1}$$

Viskozita je charakteristická vlastnosť každej kvapaliny. **S rastúcou teplotou viskozita klesá**.

Vzťah (1) platí pre väčšinu kvapalín a roztokov nízkomolekulových látok. Takéto kvapaliny sa označujú ako newtonovské. Pre viskozitu koloidných roztokov makromolekúl, suspenzií a emulzií (nenewtonovské kvapaliny) platia iné zákonitosti. Viskozita ideálnej kvapaliny je rovná nule.

Ak kvapalina prúdi trubicou tak, že každá prúdnica pretína ľubovoľný prierez trubice len raz, prúdenie označujeme ako laminárne, ak viackrát, prúdenie je turbulentné. Kritériom na určenie druhu prúdenia je Reynoldsovo číslo Re

$$Re = \frac{\rho d v}{\eta}$$

kde **ρ** je hustota kvapaliny, **d** je priemer trubice, **v** je stredná rýchlosť prúdenia a **η** je dynamická viskozita. Prúdenie je laminárne, ak Re < 2000 a turbulentné, ak Re > 10 000. V oblasti 2 000 < Re < 10 000 považujeme prúdenie za nestále, prechodné medzi laminárnym a turbulentným. Pri meraní viskozity je dôležité dodržať podmienku laminárneho prúdenia.

Meranie viskozity pomocou Höpplerovho telieskového viskozimetra.

Telieskové viskozimetre využívajú fakt, že rýchlosť pádu telieska v kvapaline je ovplyvnená viskozitou kvapaliny. Keď teliesko guľového tvaru s objemom **V,** polomerom **r** a hmotnosťou **m** vpustíme do väčšieho objemu kvapaliny, pôsobia naňho nasledovné sily (obrázok 2). Tiažová sila

$$G = m \cdot g = V \cdot \rho_S \cdot g = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho_S \cdot g \qquad (4)$$

pôsobí zvislo smerom nadol (**ρs** je hustota telieska, **g** je tiažové zrýchlenie). Podľa Archimedovho zákona je teliesko ponorené do kvapaliny nadľahčované vztlakovou silou **Fvz**, ktorá je rovná tiaži kvapaliny vytlačenej telieskom. Táto vztlaková sila je určená vzťahom

$$F_{VZ} = V \cdot \rho_L \cdot g = \frac{4}{3}\pi \cdot r^3 \cdot \rho_L \cdot g \qquad (5)$$

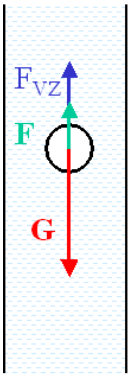
a pôsobí v opačnom smere ako tiažová sila (**ρL** je hustota kvapaliny). Reálna kvapalina s dynamickou viskozitou **η** kladie odpor pohybu telesa. Odporovú silu **F** môžeme vyjadriť pomocou Stokesovho vzťahu

$$F = 6\pi \cdot \eta \cdot r \cdot v \qquad (6)$$

kde **v** je rýchlosť, s ktorou guľôčka v kvapaline padá. Sily **G** a **Fvz** sú stále, nezávislé od rýchlosti guľôčky **v**. Odpor prostredia **F** je tým väčší, čím väčšia je rýchlosť guľôčky **v**. Hodnota rýchlosti **v** a tiež odporová sila F sa najprv zväčšujú, až kým sa nedosiahne stav, že vektorový súčet síl pôsobiacich na guľôčku sa rovná nule

$$G - F_{VZ} - F = 0 \qquad (7)$$

Guľôčka sa potom pohybuje konštantnou rýchlosťou **v** (podľa Newtonovho zákona zotrvačnosti)

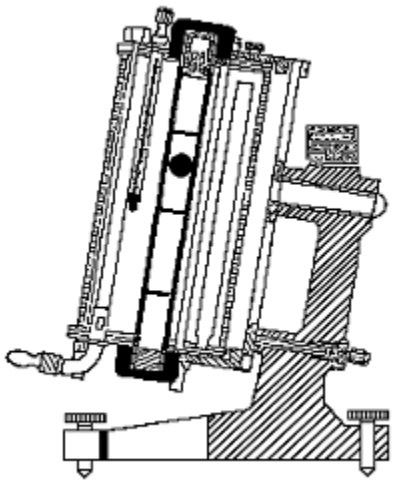


Obrázok 2: Znázornenie síl, ktoré pôsobia na guľôčku v kvapaline. G – tiažová sila, **F** – sila odporu prostredia, **Fvz** – vztlaková sila

Po dosadení vzťahov (4-6) do (7) dostávame pre rýchlosť guľôčky **v** rovnicu

$$v = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot g \cdot \frac{\rho_S - \rho_L}{\eta} \qquad (8)$$

Zo vzťahu (8) vylýva, že dynamickú viskozitu **η** kvapaliny je možné určiť pomocou rýchlosti pádu **v** guľôčky v tejto kvapaline. Na tento účel sa používa Höpplerov telieskový viskozimeter (Obr. 3).



Obrázok 3: Höpplerov telieskový viskozimeter

Jeho podstatnú časť tvorí vybrúsená trubica, do ktorej nalejeme skúmanú kvapalinu tak, aby sa v nej nenachádzali vzduchové bubliny. Trubicu je možné otáčať o 180°. Meriame dobu pádu **t** guľôčky medzi dvoma značkami na trubici, ktorých vzdialenosť je **L**. V tejto oblasti sa guľôčka pohybuje konštantnou rýchlosťou **v=L/t**.

Vzťah (8) upravíme na tvar

$$\frac{L}{t} = \frac{2}{9} \cdot r^2 \cdot g \cdot \frac{\rho_S - \rho_L}{\eta} \qquad (9)$$

Zo vzťahu (9) vyjadríme dynamickú viskozitu **η**

$$\eta = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2}{L} \cdot g \cdot (\rho_S - \rho_L) \cdot t \qquad (10)$$

Zavedieme konštantu $K = \frac{2}{9} \cdot \frac{r^2}{L} \cdot g$, ktorá nezávisí od vlastností kvapaliny. Vzťah (10) sa tým zjednoduší na tvar

$$\eta = K \cdot (\rho_S - \rho_L) \cdot t \qquad (11)$$

Konštantu viskozimetra **K** určíme experimentálne pomocou destilovanej vody, ktorej viskozita je tabelovaná

$$K = \frac{\eta}{(\rho_S - \rho_L) \cdot t} \qquad (12)$$

Vo vzťahu (12) je **t** doba pádu guľôčky v destilovanej vode a ρ_L je hustota destilovanej vody.

Meranie viskozity pomocou kapilárneho viskozimetra.

Kapilárne viskozimetre využívajú na meranie Poiseuillov zákon, podľa ktorého je objem kvapaliny **V**, ktorá pretiekla za čas *t* kapilárou s polomerom **r** a dĺžkou **L** pri laminárnom ustálenom (stacionárnom) prúdení rovný:

$$V = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot L} \cdot t \qquad \textbf{(13)}$$

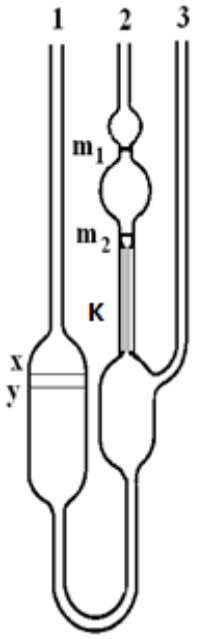
kde **Δp** je rozdiel tlakov na začiatku a na konci trubice s dĺžkou **L**.

V Ubbelohdeho kapilárnom viskozimetri (Obrázok 4) treba kvapalinu naplniť do viskozimetra tak, aby jej hladina siahala medzi rysky x a y v ramene 1. Potom sa kvapalina nasaje cez kapiláru K až po rysku m1 v ramene 2. Experiment spočíva v meraní času **t**, za ktorý preprúdi objem kvapaliny **V** medzi ryskami m1 a m2 cez

kapiláru K. Kapilára je orientovaná v zvislom smere. Rozdiel tlakov **Δp** v tomto prípade súvisí s rozdielom hydrostatických tlakov medzi začiatkom a koncom kapiláry

$$\Delta p = \Delta h \cdot \rho \cdot g \tag{14}$$

kde Δ**h** je výška kvapalinového stĺpca nad kapilárou.



Obrázok 4: Ubbelohdeho kapilárny viskozimeter

Po dosadení vzťahu (14) do rovnice (13) a jeho úprave dostaneme pre dynamickú viskozitu **η** vzťah

$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta h \cdot g}{8 \cdot V \cdot L} \cdot \rho \cdot t \tag{15}$$

Zavedieme konštantu $A = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot \Delta h \cdot g}{8 \cdot V \cdot L}$, ktorá nezávisí od vlastností kvapaliny. Vzťah (15) pre výpočet dynamickej viskozity η kvapaliny sa tým zjednoduší na tvar

$$\eta = A \cdot \rho \cdot t \tag{16}$$

Podmienkou merania pri všetkých kapilárnych viskozimetroch je laminárne prúdenie. Na začiatku a na konci kapiláry však môže dochádzať k jeho porušeniu. Preto Hagen

zaviedol korekciu vo vzťahu (16) jeho rozšírením o člen s konštantou **B**. Výsledný vzťah pre dynamickú viskozitu potom je:

$$\eta = A \cdot \rho \cdot t - \frac{B \cdot \rho}{t} \qquad (17)$$

Konštantu B zvyčajne udáva výrobca viskozimetra. Konštantu A určujeme experimentálne tak, že na meranie použijeme kvapalinu so známou viskozitou, napr. destilovanú vodu. Jej dynamická viskozita je uvedená v tabuľkách v závislosti od teploty.

Použitá literatúra:

1. Kopecký, F.: Prehľad fyziky pre farmaceutov I. (Mechanika, hydromechanika a náuka o teple). Bratislava, UK 1999. 184 s. (skriptá).
2. Kopecký, F. a kol.: Praktické cvičenia z fyziky pre poslucháčov farmácie. Bratislava, UK 1989. 240 s. (skriptá).
3. Oremusová J., Sarka K., Vojteková M.: Laboratórne cvičenia pre farmaceutov. Bratislava, Univerzita Komenského v Bratislave 2013. 102 s. (skriptá)

Vypracovala doc. RNDr. J.Gallová, CSc.