

Úloha č. 2

Měření kinematické a dynamické viskozity kapalin

Úkoly měření:

1. Určete dynamickou viskozitu z měření doby pádu kuličky v kapalině (glycerinu, roztoku polysacharidu ve vodě) při laboratorní teplotě.
2. Pomocí Ubbelohdeho kapilárního viskozimetru stanovte kinematickou viskozitu studované kapaliny. Měření proveďte při laboratorní teplotě a následně při teplotách okolo 40 °C, 50 °C a 60 °C. Zjištěné hodnoty kinematické viskozity ν přepočtete na dynamické η .
3. Měření podle bodu 1 opakujte desetkrát pro každou ze tří kuliček o různých průměrech. Měření podle bodu 2 opakujte třikrát pro každou nastavenou teplotu. Z naměřených hodnot, podle každé metody, určete průměrnou hodnotu viskozity spolu s chybou měření.
4. Z výsledků měření podle bodu 1 sestrojte graf závislosti ν na r^2 , ze směrnice tohoto grafu vypočtete hodnotu dynamické viskozity kapaliny η .
5. Z výsledků měření podle bodu 2 sestrojte graf závislosti dynamické viskozity η na teplotě.
6. V závěru protokolu porovnejte pomocí tabulky naměřené a vypočtené hodnoty viskozity podle bodu 1, 2 a 4 tohoto zadání. Zhodnoťte přesnost jednotlivých metod a závislost dynamické viskozity na teplotě.

Použité přístroje a pomůcky:

1. kovové kuličky o různých průměrech, válec se stupnicí a speciální hlavicí, magnet, stopky, metr a mikrometr,
2. Ubbelohdeho viskozimetr v temperované lázni, termostat, balónek na podtlakové nasávání kapaliny, stopky.

Základní pojmy, teoretický úvod:

Viskozita tekutiny je charakteristickou vlastností reálných kapalin, oproti ideálním, u kterých se předpokládá nulové vnitřní tření při pohybu jednotlivých vrstev kapaliny. To znamená, proudí-li reálná kapalina, jsou její části v relativním pohybu, z čehož plyne, že dvě po sobě se posunující vrstvy mají různou rychlost a dochází mezi nimi k vnitřnímu tření.

Definice: Viskozita popisuje vnitřní tření v reálné tekutině, tj. udává jak se tekutina brání tečení (deformaci v toku).

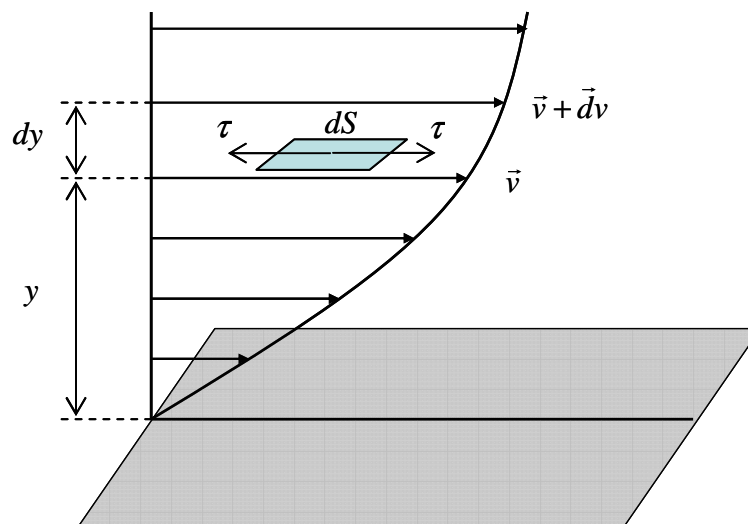
Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Vnitřní tření (viskozita) v proudící kapalině je analogická smykovému tření mezi pevnými tělesy, z toho plyne, že při viskózním proudění se kinetická energie přeměňuje na teplo podobně jako při vzájemném pohybu těles za působení tření.

Jak již bylo zmiňováno viskozita je důsledkem smykového (tečného) napětí - τ , vznikajícího mezi jednotlivými vrstvami kapaliny při jejich pohybu (toku) v důsledku třecí síly. V případě laminárního proudění u newtonských kapalin roste tečné napětí spolu s rostoucí rychlostí kapaliny od vrstvy k vrstvě. Změnu rychlosti lze charakterizovat pomocí gradientu rychlosti dv/dy , který je kolmý na směr toku, viz. obr. 1.



Obr. 1: Gradient rychlosti kolmý na směr toku. Tečné napětím v kapalině v důsledku vnitřního tření při toku.

Závislost tečného napětí na rychlosti smykové deformace (gradientu rychlosti ve směru osy y) udává vztah (1). Tento jednoduchý vztah vyslovil Newton, proto se jím řídící kapaliny nazývají **newtonské**.

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (1)$$

kde τ je smykové napětí vznikající při proudění kapaliny, dv/dy gradient rychlosti určovaný ve směru kolmém ke směru proudění a η je konstanta úměrnosti **nazývána dynamickou viskozitou**. Jednotkou dynamické viskozity je $\text{N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s} = \text{Pa} \cdot \text{s}$ (pascalsekunda).

Podíl dynamické viskozity a hustoty kapaliny se nazýváme **kinematická viskozita** ν , viz. rovnice (2), které se často používá při stanovení viskozity z experimentálních měření na kapilárních viskozimetrech. Jednotkou kinematické viskozity je $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

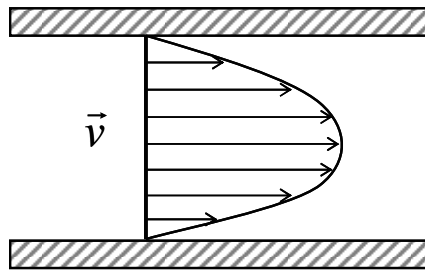
$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (2)$$

Viskozita kapalin závisí na teplotě a tlaku. **S rostoucí teplotou klesá, s rostoucím tlakem vzrůstá**. Vliv tlaku je však většinou zanedbatelný, projevuje se až při velmi vysokých tlacích.

Jak bylo již zmíněno rozhodujícím faktorem určujícím velikost viskozity je **teplota**. Závislost viskozity při stálém tlaku na teplotě lze vyjádřit vztahem (3) kde T je termodynamická teplota a A, B jsou empirické konstanty:

$$\eta = \exp\left(A + \frac{B}{T}\right). \quad (3)$$

Proudí-li ideální tekutina potrubím, předpokládáme, že její rychlost je ve všech bodech průřezu potrubí stejná. Zatímco **při toku reálné, newtonské kapaliny** malou rychlostí úzkou trubicí, se vrstvička kapaliny přiléhající ke stěnám prakticky nepohybuje a uprostřed potrubí je její rychlost naopak největší. Takové rozložení vektoru rychlosti má parabolický charakter a proudění je laminární, viz. obr. 2.



Obr. 2: Rozložení vektoru rychlosti viskózní kapaliny v potrubí při laminárním proudění.

Laminárním nazýváme takové proudění, při kterém proudová vlákna probíhají souběžně, a kapalina se nepromíchává.

Doposud jsme zmiňovali pouze newtonské kapaliny, nicméně pro úplnost je třeba ještě zmínit **neneutonské tekutiny**. Tento typ tekutin se od dříve jmenovaný newtonských liší především složitějším chováním a závislostí viskozity na rychlosti smykové deformace (rychlosti s jakou se mění tečné napětí). Takováto závislost je typická pro složitější systémy jako jsou polymerní taveniny, koncentrované roztoky polymerů, těsta, atd.. (Vzhledem k složitosti a komplexnosti chování neneutonských tekutin za toku, nebude této problematice v základních laboratorních cvičeních z fyziky věnována další pozornost).

Principy jednotlivých metod:

Přístroje a experimentální přístupy pro měření viskozity lze rozdělit do třech hlavních skupin na **tělískové** (kuličkové, Höpplerovy), **kapilární a rotační viskozimetry**. (Měření na prvních dvou typech viskozimetrů bude náplní těchto laboratoří).

1. Stanovení viskozity z měření doby pádu kuličky

Podle zadání v bodu 1 bude viskozita určována z rychlosti pádu kulového tělíska v měrné kapalině nalité ve válci s ryskami, viz. obr. 3. Při pohybu tělesa v kapalině klade kapalina tomuto pohybu odpor, který je při pomalém (laminárním) proudění úměrný rychlosti v_k . Pro odpor, který klade kapalina o viskozitě η pohybu koule o poloměru r , odvodil Stokes z pohybové rovnice pro nestlačitelné kapaliny s vnitřním třením následující vztah:

$$F_t = 6\pi\eta r v_k. \quad (4)$$

V případě pádu koule hustoty ρ_T v kapalině hustoty $\rho < \rho_T$, působí na tuto kouli tíha G zmenšená o vztlakovou sílu F_{vz} , která ji zpočátku zrychluje a platí následující vztah:

$$F = G - F_{vz} = G - V\rho g = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_T - \rho)g. \quad (5)$$

Proti síle F definované vztahem (5) působí síla odporu F_t tím víc, čím větší je rychlost v_k . Při tzv. mezní rychlosti v_m kdy $F_t = F$ bude další pohyb koule rovnoměrný. Z tohoto plyne, že mezní rychlost je dána:

$$6\pi\eta r v_m = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho_T - \rho)g. \quad (6)$$

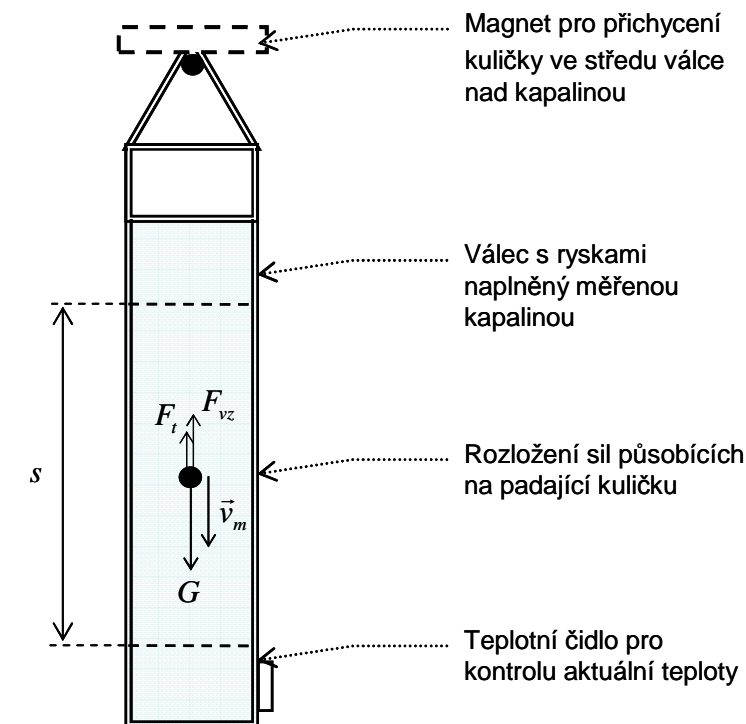
Ze vztahu (6) lze vyjádřit dynamickou viskozitu kapaliny jako:

$$\eta = \frac{2}{9}g(\rho_T - \rho)\frac{r^2}{v_m}. \quad (7)$$

Po úpravě pro mezní rychlost v_m vyplývá vztah:

$$v_m = \frac{2}{9}\frac{g(\rho_T - \rho)}{\eta}r^2. \quad (8)$$

Ze vztahu (8) vyplývá, že při zmenšování poloměru koule se velmi rychle zmenšuje mezní rychlost, definovaná vztahem (8) a zjištěná z experimentálních měření jako $v_m = s/t$, kde s je dráha a t je čas, viz obr. 3.



Obr. 3: Experimentální uspořádání pro měření dynamické viskozity kapaliny pomocí metody padající kuličky s rozložením sil působících na kuličku.

2. Měření viskozity na kapilárním Ubbelohdeho viskozimetru

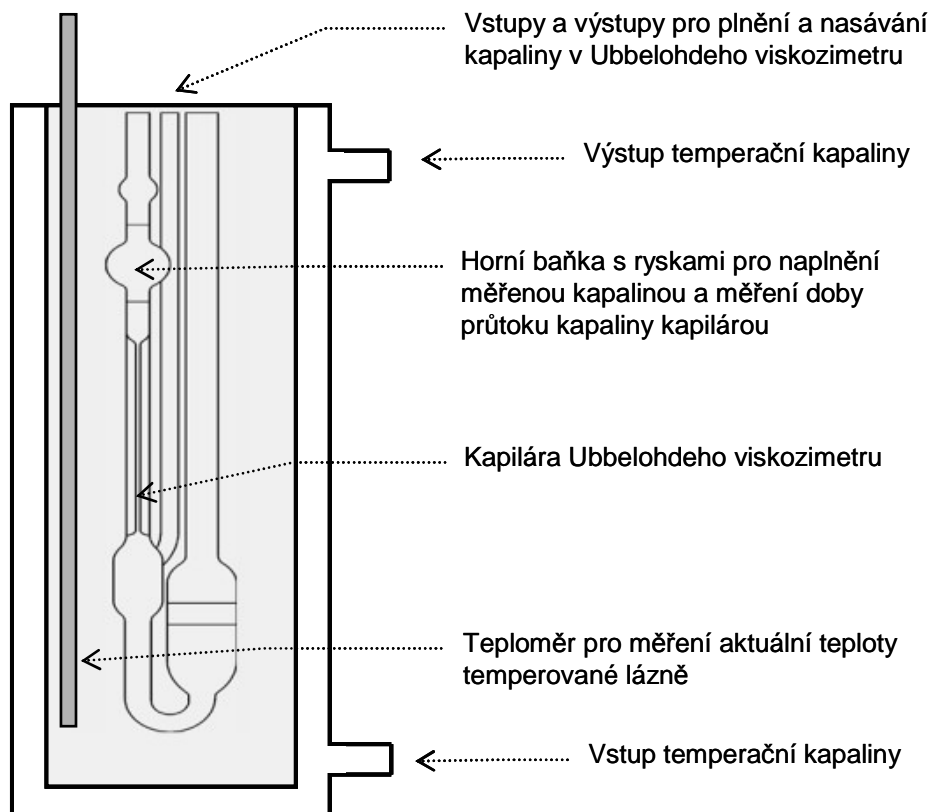
Podle zadání v bodu 2 bude viskozita měřena pomocí Ubbelohdeho kapilárního viskozimetru v závislosti na teplotě, kontrolované pomocí termostatu a vodní lázně, viz. obr. 4.

Jak bylo zmiňováno výše, proudí-li newtonská kapalina malou rychlostí úzkou kapilárou (trubicí), je rozdělení vektoru rychlosti parabolické a proudění laminární. Pro tyto experimentální podmínky odvodil Poiseuille vztah mezi objemem V kapalin o dynamické viskozitě η , jež protéká trubicí za čas t a úbytkem tlaku Δp na délce trubice l o poloměru R . Tento vztah odvozený Poiseuillem nebudeme pro zjednodušení dále uvádět a rozebírat, vzhledem k tomu, že výrobce kapilárních viskozimetrů dodává ke každému vyrobenému kusu Ubbelohdeho viskozimetru kalibrační protokol s uvedením rozsahu pro něj je viskozimetr vhodný a konstanty pro výpočet kinematické viskozity.

Z výše uvedeného plyne, že kinematickou viskozitu lze spočítat podle vztahu (9), kde A je konstanta daná výrobcem viskozimetru a t je měřený čas průtoku kapaliny mezi ryskami viskozimetru v sekundách.

$$\nu = A \cdot t \quad (9)$$

Kinematickou viskozitu vypočtenou podle vztahu (9) lze snadno přepočíst na dynamickou pomocí rovnice (2). Hustotu měřené kapaliny lze snadno stanovit pomocí pyknometru nebo ponorného hustoměru (*hustota měřené kapaliny bude uvedena v laboratoři u příslušné laboratorní úlohy*).



Obr. 4: Ubbelohdeho kapilární viskozimetr v temperované lázni.

Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem
a státním rozpočtem České republiky



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Postupy měření a pokyny k úloze:

1. Stanovení viskozity z měření doby pádu kuličky

- Tři kuličky, o co nejvíce rozdílných poloměrech, nechejte postupně padat v aparatuře podle obrázku č. 3.
- Měření opakujte desetkrát pro každou zvolenou kuličku a zaznamenávejte dobu pádu kuličky mezi vyznačenými ryskami. Z naměřených časů vypočítejte průměrné hodnoty mezní rychlost v_m .
- Každou kuličku lze snadno dostat ze dna k vrcholu nádoby pomocí magnetu. Uvolněním magnetu v horní části nádoby se kulička spouští do kapaliny.
- Pečlivě zaznamenejte podmínky měření jako je teplota, hustota kuliček, jejich poloměry, popis kapaliny, atd..
- Zpracujte výsledky do tabulek a grafů podle zadání laboratorního cvičení.

2. Měření viskozity na kapilárním Ubbelohdeho viskozimetru

- Pro stejnou kapalinu jako byla charakterizována podle předešlého bodu naměřte doby průtoku v Ubbelohdeho kapilárním viskozimetru.
- Měřte při stejné teplotě, která byla naměřena v předešlé metodě (tělískového viskozimetru) a dále pak okolo teploty 40°C, 50°C a 60°C.
- Měření opakujte třikrát pro každou teplotu. Z naměřených časů vypočítejte průměrné hodnoty kinematické viskozity ν . Tyto hodnoty přepočtete na hodnoty dynamické viskozity η .
- Pečlivě zaznamenejte podmínky měření jako je teplota, popis kapaliny, typ Ubbelohdeho viskozimetru a jeho konstanty dané výrobcem, atd..
- Zpracujte výsledky do tabulek a grafů podle zadání laboratorního cvičení.