FJFI ČVUT v Praze — **Fyzikální praktikum I**

Úloha 7 — **Verze 200921**

Měření povrchového napětí a dynamické viskozity kapalin a plynů

Abstrakt: Cílem úlohy je seznámit studenty s vybranými částmi mechaniky kontinua. V této úloze si student osvojí základní pochopení veličin jako jsou dynamická viskozita a povrchové napětí. Nedílnou součástí ulohy je pak tyto veličiny změřit. Jmenovitě se jedná o měření povrchového napětí vody nepřímou srovnávací kapkovou metodou, určení dynamické viskozity oleje Stokesouvou metodou a také určení dynamické viskozity vzduchu průtokovou metodou.

1 Pracovní úkoly

1.**DÚ:** Odvoďte následující vztah pro závislost hustoty látky ρ_ϑ jako funkci teploty ϑ.

$$\rho_\vartheta = \frac{\rho_0}{1+\beta(\vartheta-\vartheta_0)} \tag{1}$$

Kde parametr β představuje součinitel objemové teplotní roztažnosti a veličina ρ_0 popisuje známou hustotu uvažované látky při teplotě ϑ_0.

2. **DÚ:** Odvoďte vztah pro relativní chybu nepřímého měření:

a.) pro povrchové napětí kapkovou metodou $\frac{\Delta\sigma_1}{\sigma_1}$. Teoreticka funkční závislost povrchového napětí $\sigma_1 = \sigma_1(m_1^{measured}, m_2^{measured})$ je popsána rovnicí (6). Vyjděte z následujícího vztahu.

$$\Delta\sigma_1 = \sqrt{\left(\frac{\partial\sigma_1}{\partial m_1^{measured}}\right)^2 (\Delta m_1^{measured})^2 + \left(\frac{\partial\sigma_1}{\partial m_2^{measured}}\right)^2 (\Delta m_2^{measured})^2}$$

b.) pro dynamickou viskozitu měřenou Stokesovou metodou $\frac{\Delta\eta}{\eta}$. Teoretická funkční závislost dynamické viskozity $\eta = \eta(r, u, \bar{\rho})$ je popsána rovnicí (12). Pro zjednodušení výpočtu použijte substituci $\bar{\rho} = \rho - \rho_p$. Vyjděte z následujícího vztahu.

$$\Delta\eta = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta}{\partial r}\right)^2 (\Delta r)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial u}\right)^2 (\Delta u)^2 + \left(\frac{\partial\eta}{\partial\bar{\rho}}\right)^2 (\Delta\bar{\rho})^2}$$

c.) pro dynamickou viskozitu měřenou Stokesovou metodou opravenou na rozměry viskozimetru $\frac{\Delta\eta_{corr}}{\eta_{corr}}$. Teoretická funkční závislost dynamické viskozity $\eta_{corr} = \eta(r, u, \bar{\rho}, R, h)$ je popsána rovnicí (13). Pro zjednodušení výpočtu opět použijte substituci $\bar{\rho} = \rho - \rho_p$. Využijte také výsledku z předchozího podúkolu. Vyjděte z následujícího vztahu.

$$\Delta\eta_{corr} = \sqrt{\left(\frac{\partial\eta_{corr}}{\partial r}\right)^2 (\Delta r)^2 + \left(\frac{\partial\eta_{corr}}{\partial u}\right)^2 (\Delta u)^2 + \left(\frac{\partial\eta_{corr}}{\partial\bar{\rho}}\right)^2 (\Delta\bar{\rho})^2 + \left(\frac{\partial\eta_{corr}}{\partial R}\right)^2 (\Delta R)^2 + \left(\frac{\partial\eta_{corr}}{\partial h}\right)^2 (\Delta h)^2}$$

3. Změřte a určete dynamickou viskozitu oleje Stokesovou metodou. Měření opakujte 10-krát pro alespoň dva typy kuliček. Spočtěte dynamickou viskozitu bez i s korekcí na rozměry Stokesova viskozimetru, diskutujte rozdílnost výsledků. Uvažujte statistickou i systematickou chybu měření.

4. Proveďte měření objemu protékajícího vzduchu při daném úbytku tlaku v kapiláře pomocí měřící aparatury na obrázku 5. Měření proveďte alespoň pro 10 různých hodnot úbytku tlaku. Výsledky vyneste do grafu ve tvaru $(\frac{p_1^2-p_2^2}{2p_2}) = f(V_t)$ a nafitujte vhodnou funkcí. Z výsledků fitu určete dynamickou viskozitu vzduchu při pokojové teplotě.

5. Určete povrchové napětí lihu kapkovou metodou pomocí dvou různých kapilár. Uskutečněte 6 měření pro každou z kapilár. Proveďte korekci na těkavost lihu. Uvažujte statistickou i systematickou chybu měření.

2 Pomůcky

Pomůcky: Teploměr, analytické váhy se sadou závaží, Stokesův viskozimetr s olejem, stopky, ocelové kuličky, olovnice, pásové měřítko, mikrometrický šroub, voda, vodní "U"manometr, skleněné kapiláry, Mariotteovy láhve, těsnící a spojovací materiál, sada odměrných baněk a válců, líh, stojánek s nálevkou (upraveno na odkapávání kapaliny z kapiláry), Petriho miska, balónek

3 Povrchové napětí kapalin

3.1 Základní pojmy a vztahy

V důsledku povrchového napětí se kapaliny snaží dosáhnout stavu s co nejmenší energií, a tak minimalizovat svůj povrch. Nepůsobí-li na kapalinu žádně vnější síly, pak kapalina zaujme kulatý tvar, neboť koule ze všech těles stejného objemu disponuje právě nejmenší povrchem. V gravitačním poli se však kulatý povrch kapaliny deformuje v charakteristický kapkovitý tvar.

Tohoto jevu úspěšně využívá hmyz. Např. vodoměrka, bruslařka nebo hladinatka se díky povrchovému napětí vody udrží na vodní hladině, a tak se po ní mohou i pohybovat. Dále tento jev využívají např. čistící a prací prostředky, které mají menší povrchové napětí než voda. Roztok vody s čistícím prostředkem tak disponuje nižším povrchovým napětí, čímž se usnadňuje smáčení a tak je možné smáčet i mastný povrch. Jinak řečeno, sníží-li se povrchové napětí, pak se povrchové síly mezi molekulami (např. v mýdlovém roztoku) zmenší, proto mýdlový roztok lépe smáčí nečistoty, které pak lze snadněji mechanicky odstranit.

Působí-li na délku l síla $\vec{F}$ pak povrchové napětí kapaliny $\vec{\sigma}$ definujeme následujícím vztahem.

$$\vec{\sigma} = \frac{\vec{F}}{l}. \tag{2}$$

Je to tedy tečná síla F působící v rovině povrchu kapaliny vztažená na jednotku délky l. V soustavě SI je jednotkou povrchového napětí N.m^{-1}.

Poznamenejme, že různé kapaliny mají různá povrchová napětí. Také s teplotou se povrchové napětí mění. S rostoucí teplotou se povrchové napětí snižuje, protože se zvětšuje kinetická energie neuspořádaného pohybu molekul. Na povrchové napětí má dále značný vliv i látka, která se nachází nad jejím povrchem. Některé páry např. éterové, povrchové napětí podstatně snižují.

Povrchové napětí můžeme určovat buď přímo změřením síly, kterou povrchové napětí působí na známou délku (měření pomocí torzních vah), nebo užitím kapilárních efektů (kapilární elevace a deprese). Vy určíte povrchového napětí kapaliny nepřímou kapkovou metodou, pomocí srovnávání hmotností kapek, odkapaných z kapiláry.

3.2 Kapková metoda

3.2.1 Kapková metoda - Odvození

Tato metoda je založena na tom, že kapalina vytékající ze svislé trubice zůstává lpět na jejím spodním okraji ve tvaru kapky, která se odtrhne, jakmile tíha kapky přesáhne velikost síly vyvolané povrchovým napětím působícím na vnějším obvodu trubice. Těsně před odtržení kapičky o hmotnosti m od trubice o vnější poloměru R bude tedy tíhová síla $F_g = mg$ rovna síle povrchového napětí $F_\sigma = \sigma l = \sigma \cdot 2\pi R$. Můžeme tedy napsat následující rovnici.

$$mg = 2\pi R\sigma \tag{3}$$

Tuto hmotnost m však nelze změřit, neboť menší část kapky zůstane lpět na spodním konci trubice.

Uvažujme nyní dvě růzké napaliny a jednu a tutéž trubici na odkapávání. Pak pro obě kapaliny budou analogicky platit následující rovnice

$$m_1^{real} g = 2\pi R\sigma_1$$
$$m_2^{real} g = 2\pi R\sigma_2$$

Geometrický faktor $2\pi R$ a tíhové zrychlení g je v obou rovnicích stejné. Poměr povrchový napětí dvou kapalin tak odpovídá poměru hmotností.

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{m_1^{real}}{m_2^{real}} \tag{4}$$

Učiníme-li předpoklad, že při odtržením kapičky z hrdla trubice ulpívá na hrdle stále též množství kapaliny, pak vážením stejného množství kapek dvou různých kapalin dostaneme hmotnosti, které jsou ve stejném poměru jako hmotnosti celých kapek před jejich odtržením.

$$\frac{m_1^{real}}{m_2^{real}} = \frac{m_1^{measure}}{m_2^{measured}}. \tag{5}$$

Ze vztahů (4) a (5) tak získáme

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{m_1^{measured}}{m_2^{measured}}. \tag{6}$$

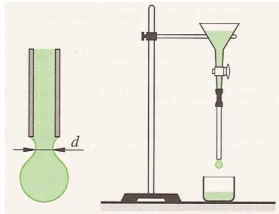
Znáte-li jednu z hodnot σ_1, σ_2 pak můžete po změření hmotností $m_1^{measured}$ a $m_2^{measured}$ snadno určit i povrchové napětí druhé z kapalin. Toto je princip poměrné metodody.

3.3 Kapková metoda - Postup měření

Kapkovou metodou budete měřit povrchové napětí lihu. Jako referenční kapalinu se známým povrchovým napětím použijte vodu. Aparatura je zobrazena na Obr. 1 Při měření kapkovou metodou necháte obě kapaliny odkapávat z téže silnostěnné kapiláry se zabroušeným spodním koncem do zabroušené skleněné lahvičky. Tu je možno uzavřít, a tak zamezit vypařování. Vždy odkapejte stejné množství kapek. Na analytických vahách následně zvažte hmotnost odkapané kapaliny. Po každém měření důkladně vysušte skleničku, do které odkapáváte kapalinu z kapiláry. Pro vysušení můžete použít infra lampu. Měření alespoň 6-krát pro dvě různé kapiláry. Dále proveďte korekci na těkavost lihu. Ta spočívá v určení hmotnosti vypářené kapaliny během průměrného času měření. Poznamenejme, že líh se při pokojové teplotě vypařuje z povrchu kapaliny, proto, odkapáváte-li líh do různých nábob, proveďte korekci na odpařování lihu pro každou z nich.

Poznámky k měření a vypracování

- líh se během měření odpařuje, postupujte pokud možno co nejrychleji, aplikujte korekci na těkavost lihu
- analytické váhy jsou velmi citlivé, zacházejte s nimi velmi opatrně. Pokud analytické váhy používáte poprvé, přečtěte si k nim návod na stránkách praktik.
- uvažujte následující tabulkovou hodnotu povrchového napětí vody $\sigma_{H_2O}^{tab} = 72,75 \cdot 10^{-3}$ Nm^{-1} [3]



Obrázek 1: Schéma aparatury pro měření povrchového napětí kapalin kapkovou metodou. Převzato z [4]

4 Dynamická viskozita tekutin

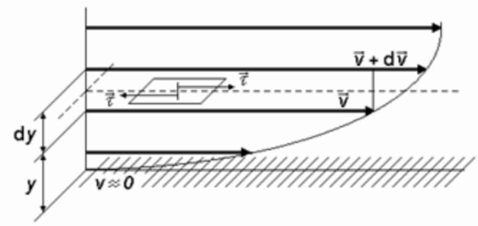
4.1 Základní pojmy a vztahy

Matematický popis tekutin je poměrně složitý, proto se běžně používají jistá zjednodušení. Zavádí pojem ideální kapalina a ideální plyn. Ideálním plynem rozumíme dokonale stlačitelný plyn bez vnitřního tření. Ideální kapalinou si zase představujeme dokonale nestlačitelnou a opět bez vnitřního smykového tření mezi molekulami. Na druhou stranu v reálných tekutinách ono smykové (tečné) napětí, tedy tření, existuje.

Proudí-li reálná kapalina např. trubicí, pak jsou její části v relativním pohybu. Proto mezi dvěma vrstvami kapaliny, které se pohybují s různou rychlostí, vzniká na jejich rozhraní tečné (smykové) napětí. Smykové napětí je vyvoláno vnitřním třením mezi molekulami kapaliny, jinými slovy vlastní viskozitou kapaliny η. Jestliže předpokládáme, že kapalina proudí rychlost v ve směru osy x a její velikost se mění podél osy y, pak vztah mezi smykovým (tečným) napětím τ na rychlosti smykové deformace je popsána vztahem.

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \tag{7}$$

Pod pojmem rychlost smykové deformace rozumíme změny velikosti rychlosti kapaliny v v různých vrstvách kapaliny ve směru osy y viz. Obr. 2.



Obrázek 2: Změna rychlosti smykové deformace při laminárním proudění kapaliny trubicí

Konstanta úměrnosti η v rovnici 7, je též označovaná jako koeficient vnitřního tření nebo jako dynamická viskozita. Je závislá na povaze kapaliny. Její jednotkou v soustavě SI je N.s.m^{-2} čili Pa.s. Jinak řečeno, rozměr dynamické viskozity η je $[\eta]$ = kg.m^{-1}.s^{-1}. V praxi se však užívá vedlejší jednotka s názvem 1 poise (1 P) s přepočtem 1 P = 10^{-1} N.s.m^{-2}.

Kromě dynamické viskozity η, definované rovnicí 7, se definuje také kinematická viskozita ν následujícím vztahem.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \tag{8}$$

Symbol ρ představuje hustotu kapaliny. Rozměr kinematické viskozity v SI jednotkách je tedy $[\nu] = \mathrm{m}^2.\mathrm{s}^{-1}$. V praxi ale užívá vedlejší jednotka 1 stok (1 St) s přepočtem 1 St = 10^{-4} $\mathrm{m}^2.\mathrm{s}^{-1}$. Zde ještě uveďme základní metody pro měření dynamické viskozity, které můžeme rozdělit do následujících 3 základních kategorií:

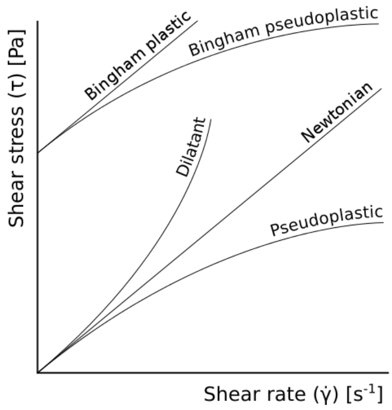
1) Tělískové viskozimetry jsou založeny na principu měření rychlosti pohybu vhodně zvoleného tělesa ve zkoumané kapalině. Příkladem je Stokesův viskozimetr, který použijete pro měření dynamické viskozity ricínového oleje.

2) Průtokové viskozimetry jsou založeny na principu měření průtoku zkoumané tekutiny při laminárním proudění kapilárou a zvoleném tlakovém gradientu na koncích kapiláry. Touto metodou budete zkoumat a měřit dynamickou viskozitu vzduchu.

3) Rotační viskozimetry jsou založeny na měření viskozity prostředí na základě odporu, který klade prostředí otáčivému pohybu vhodně zvolených těles.

Poznamenejme, že lineární závislostí 7 smykového napětí a rychlosti smykové deformace disponují pouze tzv. Newtonovské kapaliny. Existuje celá řada kapalin, které mají mnohem komplikovanější závislost, takové kapaliny označujeme jako Nenewtonovské. Viskozita Nenewtonowských kapalin může záviset např. na rychlosti smykové deformace $\frac{dv}{dy}$ (gradientu rychlosti) viz. Obr 3, nebo na čase t. Rozlišujeme tak diletantní, pseudoplastické, birminghemské a tixotropní kapaliny.

Viskozita diletantních kapalin roste s rychlostí smykové deformace, proto při máchání nebo hnětení diletantní kapalina houstne a nabývá podobných vlastností jako pevné látky. Příkladem může být suspenze škrobu. Pseudoplastické a plastické kapaliny se chovají právě opačně, s rostoucím rychlostním gradientem jejich viskozita klesá, a tak se tyto látky stávají tekutější. Příkladem je kečup, šlehačka, krev, různé barvy nebo třeba laky na nehty. Birminghamské kapaliny pak disponují jistou mezní hodnotou vnitřního napětí, od které se stávají tekuté, příkladem může být bláto či zubní pasta. Uveďme ještě tixotropního kapaliny, u kterých viskozita klesá s časem. Toto se využívá např. některých barev a laků, kdy se barva/lak štětcem snadno nanáší a po nanesený lak již dále nestéká. Podobné kapaliny také často bývají vděčným tématem při popularizačních přednáškách fyziky spojených s pozoruhodnými fyzikálními pokusy.



Obrázek 3: Graf vnitřního tření τ v závislosti na rychlosti smykové deformace $\dot{\gamma} \equiv \frac{dv}{dy}$. Podle této závislosti lze rozlišit různé druhy kapalin: Newtonowské a Nenewtonowské. Nenewronoeské pak lze dále rozdělit na pseudoplastické, diletantní a birminghamské. Převzato z [6]

4.2 Stokesova metoda

4.2.1 Stokesova metoda - Odvození

Dynamickou viskozitu budeme měřit pomocí Stokesova viskozimetru, který je zobrazen na Obr. 4. Jedná se o skleněný válec naplněný zkoumanou kapalinou. Válec je dále opatřen teploměrem a otvorem pro vhazování předmětů, např. kuliček.

Uvažujme tedy pád kuličky ve viskozní kapalině o hustotě ρ_p. Kuličku pak budeme charakterizovat hmotností M, poloměrem r, objemem V a a hustotou $\rho > \rho_p$. Na tuto kuličku bude tedy působit tíhová, vztlaková a odporová síla prostředí. Po vhození kuličky do Stokesova viskozimetru, bude zpočátku kulička urychlována tíhovou silou, dokud se velikost tíhové F_g a vztlakové sily F_{vz} nevyrovná síle odporové F_{odp}.

$$F_g + F_{vz} = F_{odp} \tag{9}$$

Tehdy kulička nabude mezní rychlosti u a nadále bude konat rovnoměrný přímočarý (svislý) pohyb. Odporovou sílu působící na kuličku o poloměru r v prostředí s viskozitou η lze popsat jako $F_{odp} = 6\pi\eta rv$. Poznamenejme, že tento vztah platí pouze pro nízké rychlosti obtékající kapaliny okolo tělesa, tzv. laminární proudění. Nyní můžeme do rovnice (9) dosadit a následně upravit.

$$Mg - V\rho_p g = 6\pi\eta ru \tag{10}$$

po vyjádření hmotnosti kuličky M pomocí hustoty ρ jako $M = V\rho = \frac{4}{3}\pi r^3\rho$ tak získáme následující rovnost.

$$\frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_p)g = 6\pi\eta ru \tag{11}$$

Odtud je patrné, že rovnoměrný pohyb kuličky se ustaví tím rychleji, čím menší bude rozdíl hustot $\rho - \rho_p$ a čím menší bude poloměr koule r. Nyní z této rovnice vyjádříme kýženou viskozitu kapaliny η jako

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{gr^2}{u}(\rho - \rho_p). \tag{12}$$

V praxi se ještě používá korekce na konečnou velikost trubice

$$\eta = \frac{2}{9}\frac{gr^2}{u}(\rho - \rho_p)\frac{1}{\left(1 + \frac{2{,}4r}{R}\right)\left(1 + \frac{3{,}3r}{h}\right)}, \tag{13}$$

kde R je poloměr trubice a h výška olejového sloupce uvnitř trubice.

4.2.2 Stokesova metoda - Postup měření

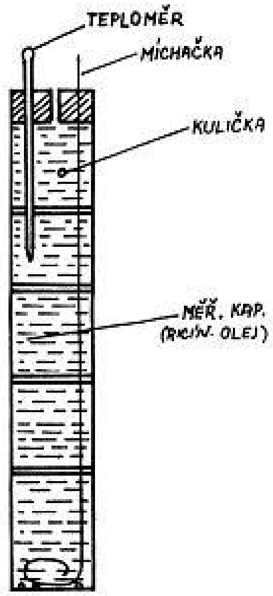
Měření se provádí vhazováním ložiskových kuliček o daném poloměru r do Stokesova viskozimetru. Stopkami měříte čas t, za který ložisková kulička urazí vámi zvolenou svislou vzdálenost d rovnoměrným pohybem. Vámi zvolenou vzdálenost, tedy dráhu rovnoměrně padající kuličky ve Stokesově viskozimetru, si vyznačte lihovým fixem a změřte metrem. Je vhodné provádět měření ve střední třetině trubice Stokesova viskozimetru. Pro měření použijte alespoň 2 typy různě velkých kuliček a pro každý typ kuliček opakujte měření 10-krát.

Vážení kuliček provádějte na analytických vahách. Pro zvýšení přesnosti zvažte cca 10 kuliček najednou a následně spočtěte průměrnou hmotnost kuličky. Poloměr r resp. průměr Vámi používaných kuliček změřte mikrometrickým šroubem pro několik náhodně vybraných kuliček a opět následně vypočtěte průměrnou hodnotu.

Viskozitu oleje pak spočtete ze vztahu (12) resp. (13), kde rychlost rovnoměrně padající kuličky u ve Stokesově viskozimetru určíte jako $u = \frac{d}{t}$. Pro výpočet viskozity použijte oba uvedené vztahy a diskutujte získané výsledky.

Poznámky k měření a vypracování:

- před samotným měřením si ověřte, že kulička po Vámi vytyčené dráze koná rovnoměrný pohyb
- při vhazování kuliček do Stokesova viskozimetru dbejte na to, aby se kuličky nepohybovaly blízko stěn, a aby byla dodržena podmínka laminárního proudění
- hustotu ložiskové kuličky ρ spočtěte ze známého vztahu $\rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{\frac{4}{3}\pi r^3}$
- hustota ricínového oleje závisí na okolní teplotě, využijte tedy vztahu (1). Hustotu ricínového oleje při 18 $^\circ$C odpovídá hodnotě $\rho_{olej}^{18^oC} = 961$ kg.m^{-3}, jeho objemová teplotní roztažnost je $\beta_{olej} = 0,69.10^{-3}$ K^{-1}
- pro zahrnutí korekce na rozměry Stokesova viskozimetru bude potřebovat znát jeho vnitřní poloměr R a výšku h olejového sloupce v trubici. Neopomeňte si tyto údaje změřit.
- podobně jako v domácím úkolu určete během vypracování relativní nejistoty veličin ρ, ρ_p, u, které určujete z nepřímého měření. Získané vztahy uveďte ve Vašem protokolu a zohledněte je při následném výpočtu chyb $\Delta\eta$ a $\Delta\eta_{corr}$.



Obrázek 4: Stokesův viskozimetr

4.3 Průtoková metoda

4.3.1 Průtoková metoda - Poiseuillova rovnice

Stacionární laminární proudění plynu, tedy proudění bez turbulencí, válcovou trubicí v oblasti tlaků 10^2-10^5 Pa popisuje následující Poiseuillova rovnice.

$$V_t = \frac{\pi}{8\eta}\frac{r^4}{l}(p_1 - p_2)\frac{p_1 + p_2}{2p_2}; \quad V_t = \frac{V}{t} \tag{14}$$

Tato rovnice tedy popisuje proudění stlačitelné tekutiny trubicí v závislosti na dynamické viskozitě η. Veličiny r a l popisují rozměry uvažované válcové trubice, r reprezentuje její vnitřní poloměr a l její délku. Symboly p_1, p_2 pak odpovídají vstupnímu a výstupnímu tlaku na okrajích této trubice. Dále, V_t představuje průtok plynu uvažovanou trubicí. Jinými slovy objem plynu V, který proteče trubicí za čas t při tlakovém gradientu $\Delta p = p_1 - p_2$.

Poznamenejme, že člen $\frac{p_1+p_2}{2p_2}$ se v rovnici (14) objevuje jako důsledek stlačitelnosti plynů. V případě nestlačitelných kapalin, které lze navíc charakterizovat podmínkou $\nabla\vec{v} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0$ se tato závislost neobjevuje.

Z rovnice (14) lze tedy vyjádřit viskozitu plynu η jako

$$\eta = \frac{\pi}{8V_t}\frac{r^4}{l}(p_1 - p_2)\frac{p_1 + p_2}{2p_2}. \tag{15}$$

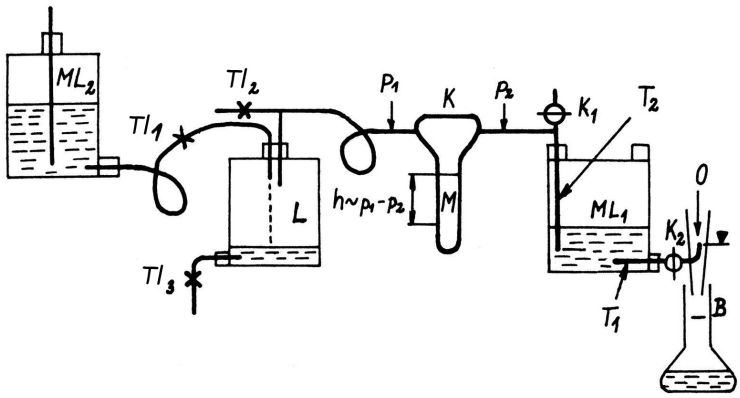
4.3.2 Průtoková metoda - Postup měření

Nyní budete měřit dynamickou viskozitu vzduchu průtokovou metodou. Měřící aparatura je zobrazena obrázku 5. Jedná se soustavu tří Mariotteových lahví (M, $ML1$, $ML2$) s "U"manometrem M. Přečerpáváním vody z Mariotteovy láhve $ML2$ do L vyvoláme přetlak p_1 v láhvi L, který usměrní pohyb vzduchu do oblasti s nižším tlakem. Jestliže otevřeme uzávěr $K1$, pak hodnota výstupního tlaku p_2 odpovídá právě atmosferickému tlaku. Vzduch tedy proudí skrze kapiláru K nad "U"manometrem M. V "U"manometru je pak možno změřit změnu tlaku $\Delta p = p_1 - p_2$ na vstupu a výstupu z kapiláry K. Změnu tlaku určíte z výšky vodního sloupce v "U"manometru jako změnu hydrostatického tlaku. Poznamenejme, že kapilára K nad "U"manometrem M je právě ona válcová trubice, pro jejíž průtok plynu (vzduchu) platí výše uvedená Poiseuillova rovnice (5).

Nyní uzavřeme kohout $K1$. Tím usměrníme plyn vycházející z kapiláry K do svislé trubice $T2$, která vede do poslední Mariotteovy láhve $ML1$. Zde plyn probublává vodní lázeň a následně vytlačuje vodu trubicí $T1$ a otvorem O. Zde je důležité, aby spodní otvor svislé trubice T_2 byl ponořen ve vodě a to ve stejné výšce, jako se nachází otvor O pro výpust vody. Z takto upravené láhve nemůže voda vytékat samovolně. Odtéká jen tehdy, pokud jsme v aparatuře vyvolali přetlak (viz. předchozí odstavec). Nyní můžete měřit objem vody V vytékající z Mariotteovy láhve $ML1$ otvorem O čas t. K měření tedy použijte stopky a odměrný válec. Atmosferický tlak odečtěte z digitálního, nebo rtuťového barometru.

Poznámky k měření a vypracování:

- pokud Vám i po výše popsaném postupu voda neodtéká z otvoru O, pravděpodobně uniká z aparatury vzduch jiným otvorem, zkontrolujte tedy kohouty a těsnění
- pro měření by měl být konec svislé trubice T_2 pod vodou a ideálně ve stejné výšce jako otvor O
- průměr kapiláry nad "U"manometrem je d =0,78 mm, délka kapiláry l =91,6 mm
- vztah mezi výškou vodního sloupce v "U"manometru a hydrostatickým tlakem je $p = h\rho g$, kde ρ odpovídá hustotě vody, h výšce vodního sloupce a g tíhovému zrychlení
- pokud pro měření atmosferického tlaku použijete rtuťový barometr použijte následující přepočet Torrů na Pascaly p_{Pa}= 133,322 $\times p_{\mathrm{Torr}}$
- během měření budete přelévat vodu mezi nádobami, prosím manipulujte s vodou obezřetně
- na konci měření naplňte láhev $ML1$, $ML2$ vodou z vodovodu, vodu z láhve M vypusťte, dále vysušte mokrá místa. Děkuji.



Obrázek 5: Schéma měřící aparatury pro měření dynamiské viskozity plynu. Symboly M, $ML1$, $ML2$ reprezentují 3 Mariotteovy láhve, písmeno M označuje manometr (tzv. "U"manometr). Válcová kapilára je ztotožněna se symbolem K o vstupním tlaku p_1 a vystupním tlaku p_2. Poznamenejme, že rozdíl tlaků v kapiláře $\Delta p = p_1 - p_2$ je určen změnou hydrostatického tlaku v "U"manometru. Jinými slovy, Δp je úměrný výšce vodního sloupce v "U"manometru M. Dále, kohouty pro manipulaci s vodou a plynem představují symboly K_1, K_2 a $TL1$, $TL2$, $TL3$. Sklenené trubice pak popisují znaky $T1$ a $T2$ a konečně B představuje baňku, resp. odměrný válec, na vytékající vodu z aparatury.

5 Rozumím tomu?

Obecně

- Jaký je rozdíl mezi ideální a reálnou tekutinou? Proč se zavádí pojem ideální/reálný plyn, ideální/reálná kapalina?
- Co je to vnitřní odpor kapaliny, viskozita. Jak se projevují?
- Jaký je rozdíl mezi newtonovskou a nenewtonovskou kapalinou? Znáte nějaké příklady. Jaké mají využití?

Kapková metoda

- Co je to povrchové napětí? Kde se s ním v běžném životě setkáte? Čím se projevuje? Jak se může změřit? Jak je možné snížit povrchové napětí uvažované látky?
- Jak závisí hustota látky/kapaliny na teplotě?
- Proč potřebujeme referenční kapalinu (např. vodu), když nás zajímá povrchové napětí lihu?
- Jaké korekce měření zohledníte při vašem zpracování a proč?

Stokes

- Jaké síly působí na kuličku ve Stokesově viskozimetru?
- Proč dochází k rovnoměrnému pohybu padající kuličky ve Stokesově viskozimetru?
- Jak určíte hustotu ložiskových kuliček a hustotu oleje ve viskozimetru? Mohli byste hustotu oleje v praktiku také změřit? Jak? Co je to pyktometr?
- Proč se aplikuje korekce na rozměry Stokesova viskozimetru?

Průtoková metoda

- Jaký je vztah mezi tlakem výškou vodního sloupce v "U"manometru?
- Proč je důležité aby trubice, která přivádí proudící vzduch do poslední Marioteovy láhve byla pod vodou a dále byla umístěna právě ve výšce ve které je umístěna výpust této Marioteovy láhve?
- Jaká je příčina toho, že se Vám nedaří vyvolat přetlak v měřící aparatuře, který by se projevil změnou výšky vodního sloupce v "U"manometru, přestože postupujete podle návodu?
- Jak z měření získáte dynamickou viskozitu? Jakou očekávám závislost objemového průtoku na veličině ($\frac{p_1^2-p_2^2}{2p_2}$). Pokud budu tuto závislost fitovat s konstantním posunutím, co fyzikálně to znamená?

Reference

[1] *Chyby měření*,
http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/chybynav/chyby-o.pdf

[2] *Návody k přístrojům*,
http://praktikum.fjfi.cvut.cz/documents/chybynav/navody-o.pdf

[3] *Online fyzikální tabulky converter.cz*, http://www.converter.cz/tabulky/povrchove-napeti.html

[4] M. Jahoda, Prezentace- *Fyzikální vlastnosti tekutin*,
http://docplayer.cz/24096184-Hydromechanicke-procesy-fyzikalni-vlastnosti-tekutin.html

[5] I. Štoll, J. Tolar, *Teoretická fyzika*, České učení technické v Praze, 2008

[6] Kolektiv autorů, *Wikipedia, The Free Encyklopedia - Non-Newtonian fluid*,
en.wikipedia.org/wiki/NonNewtonian_fluid