



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Moduly jako prostředek inovace v integraci výuky moderní fyziky a chemie
reg. č.: CZ.1.07/2.2.00/28.0182

ZÁKLADY REOLOGIE A REOMETRIE KAPALIN

Renata Holubová

Olomouc 2014

Oponenti: prof. RNDr. Jan Novotný, CSc.
Mgr. Milan Vůjtek, Ph.D.



Text vznikl za podpory projektu OPVK: Moduly jako prostředek inovace v integraci výuky moderní fyziky a chemie (CZ.1.07/2.2.00/28.0182).
Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.

1. vydání

Neoprávněné užití tohoto díla je porušením autorských práv a může zakládat občanskoprávní, správněprávní, popř. trestněprávní odpovědnost.

© Renata Holubová, 2014

© Univerzita Palackého v Olomouci, 2014

ISBN 978-80-244-4178-8

OBSAH

1 Vlastnosti kapalin.....	5
2 Newtonské kapaliny.....	14
3 Viskozimetry.....	18
4 Ne-newtonovské kapaliny, reologie.....	23
5 Experimentální část.....	31
Literatura.....	49

1 Vlastnosti kapalin

Základní dělení kapalin – reálné (skutečné) kapaliny a ideální (dokonalé) kapaliny. Pro popis vlastností kapalin zavádíme pojem ideální kapalina – je to kapalina bez vnitřního tření (neviskózní), má nulovou objemovou roztažnost i stlačitelnost, nulovou rozpustnost plynů, nevypařuje se. Dále se kapaliny dělí na **newtonské** (např. voda), u nichž je viskozita při dané teplotě a tlaku fyzikální konstantou a **nenevtonské** (např. emulze, směsi pevných látek s kapalinami, natěračské barvy), jejichž viskozita není fyzikální konstantou.

Proudění reálné kapaliny:

Laminární – částice se pohybují ve vrstvách, které jsou vzájemně rovnoběžné, přičemž nedochází k přemísťování částic kolmo ke směru pohybu.

Turbulentní – částice mají kromě postupné rychlosti také turbulentní (fluktuacioní) rychlost, pomocí které se přemísťují po průřezu.

Normálové a tečné napětí, viskozita

Uvažujme elementární plochu uvnitř kapaliny dS . Předpokládejme, že na ni působí elementární síla dF , kterou můžeme rozložit na normálovou složku dF_n (působí kolmo na uvažovanou plochu) a tečnou složku dF_t (vyvolává v kapalině posun částic).

Normálové napětí je dáno jako podíl normálové elementární síly a velikosti dané plochy:

$$p = \frac{dF_n}{dS}. \quad (1)$$

Normálové napětí je **tlak**, jednotkou je pascal (Pa). V kapalině nelze vyvolat tahové napětí, a proto tlak měříme jako kladný. Měříme-li tlak od nulové hodnoty, hovoříme o tzv. absolutním tlaku. Někdy je výhodné měřit tlak od jistého referenčního tlaku (většinou atmosférický tlak). Tlakové diference nad resp. pod tímto tlakem nazýváme přetlak resp. podtlak.

Tečné napětí (třecí, smykové) je dáno jako podíl tečné elementární síly a velikosti dané plochy:

$$\tau = \frac{dF_t}{dS}. \quad (2)$$

Tečné napětí vyvolá v kapalině posun částic. Pro elementární hranol o výšce dy , jehož spodní stěna se pohybuje rychlostí v a horní stěna rychlostí $v + dv$, pak ISAAC NEWTON odvodil vztah:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (3)$$

kde η je **dynamická viskozita kapaliny** a $\frac{dv}{dy}$ je rychlostní spád (tzv. smyková rychlost). Tečné napětí je tedy úměrné rychlostnímu spádu a konstantou úměrnosti je dynamická viskozita, jejíž rozměr je:

$$[\eta] = \left[\frac{\tau}{\frac{dv}{dy}} \right] = \text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Dynamická viskozita kapalin je obecně závislá na teplotě (s rostoucí teplotou klesá) a na tlaku (závislost je zanedbatelná). U newtonovských kapalin se dynamická viskozita nemění v závislosti na tečném napětí. V případě ne-newtonovských kapalin je dynamická viskozita závislá na tečném napětí a rychlostním spádu.

Kromě dynamické viskozity zavádíme také veličinu **kinematická viskozita**, která je definována vztahem

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (4)$$

kde ρ je hustota kapaliny. Jednotka kinematické viskozity:

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

Viskozita kapalin je definována za předpokladu laminárního proudění kapalin. Projevuje se jako odpor proti pohybu částic kapaliny. Viskozita je závislá na druhu kapaliny.

1. Newtonovské kapaliny – viskozita závisí jen na teplotě, je splněna přímá úměrnost mezi smykovým napětím a gradientem rychlosti (Newtonův zákon viskozity) (např. voda, mléko, roztok cukru, minerální oleje).

2. Ne-newtonovské kapaliny časově závislé – viskozita závisí na čase. Rozlišujeme kapaliny:
 - thixotropní (s časem řidnou, viskozita s časem klesá) – používají se v chemii, potravinářství (jogurt)
 - rheopetické (s časem houstnou, viskozita s časem roste) – nevyskytují se tak často, příkladem je sádra
3. Ne-newtonovské kapaliny na čase nezávislé – závisí na teplotě. Rozlišujeme kapaliny:
 - pseudoplastické (řidnoucí) – viskozita klesá se zvyšujícím se smykovým napětím (šampón, koncentráty džusu, kečup)
 - dilatantní (houstnoucí) – viskozita roste se zvyšujícím se tečným napětím (mokrý písek, koncentrované suspenze škrobu)
 - plastické – mají mez poddajnosti (tvaroh, zubní pasta)

Závislost viskozity na teplotě lze vyjádřit pomocí vztahu

$$\eta(T) = k \cdot e^{\frac{b}{T+\Theta}}, \quad (5)$$

kde konstanta k má rozměr viskozity ($\text{Pa} \cdot \text{s}$), b a Θ jsou konstanty charakteristické pro danou tekutinu, jejich jednotka je kelvin.

Tabulka 1. Hodnoty viskozity vody a glycerínu

T [°C]	η [mPa·s]	η [mPa·s]
	voda	glycerín
0	1,792	12 100
20	1,002	1 480
40	0,653	238
60	0,466	81

Závislost viskozity na tlaku vyjadřuje vztah $\eta(p) = \eta_0 e^{\alpha p}$, α je koeficient závislý na teplotě.

Průtok kapaliny kapilárou

Charakteristické veličiny pro popis průtoku jsou:

- tlakový rozdíl $\Delta p = p_1 - p_2$,
- délka kapiláry l ,
- poloměr kapiláry r .

Tlaková síla F_p se musí v stacionárním případě rovnat síle tření F_R působící na povrch válce

$$F_R = F_p$$
$$\eta 2\pi r l \frac{dv}{dr} = \eta S \frac{dv}{dr} = r^2 \pi \Delta p, \quad (6)$$

kde $S = 2\pi r l$. Rovnici řešíme pro v , poté integrujeme obě strany, okrajová podmínka je $v(R) = 0$ (tekutina ulpívá na stěně, a proto se nepohybuje), dostaneme následující rychlostní profil

$$v(r) = \int_r^R \frac{p_1 - p_2}{2\eta l} r dr = \frac{p_1 - p_2}{4\eta l} (R^2 - r^2) \quad (7)$$

Jedná se o parabolické rozložení rychlostí, tzn. že rychlost $v(r)$ prostorově tvoří rotační paraboloid. Dále můžeme uvažovat množství tekutiny V , které proteče za dobu t kapilárou.

$$\frac{V}{t} = \int v(r) dS = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^R r dr v(r) = \frac{\pi \Delta p}{2\eta l} \left(\int_0^R R^2 r dr - \int_0^R r^3 dr = \frac{\pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{l} R^4 \right) \quad (8)$$

Navierova-Stokesova rovnice

Představuje pohybovou rovnici reálné proudící kapaliny. Na reálnou kapalinu působí gravitační síla, tlaková síla a třecí síla. Celkovou sílu lze vyjádřit jako součet všech působících sil. Cílem řešení je najít rozložení rychlostí a tlaků. Je proto třeba znát jednak vnější zrychlení, dále hustotu kapaliny a vnější podmínky.

$$\vec{F}_c = \vec{F}_p + \vec{F}_g + \vec{F}_R.$$

Po dosazení máme

$$\vec{F}_c = \Delta m \vec{a} = \rho \Delta V \frac{d\vec{v}}{dt} = \Delta m \vec{g} - \text{grad } p \Delta V + \eta \vec{\nabla}^2 \vec{v} \Delta V.$$

Po vydělení objemem ΔV dostaneme:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{g} - \text{grad } p + \eta \vec{\nabla}^2 \vec{v} \quad (9)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \vec{v} = \rho \vec{g} - \vec{\nabla} p + \eta \vec{\nabla}^2 \vec{v} \quad (10)$$

$$\vec{a} - \frac{1}{\rho} \cdot \text{grad } p + \nu \cdot \Delta \vec{v} + \frac{\nu}{3} \cdot \text{grad } \text{div } \vec{v} = (\vec{v} \cdot \text{grad}) \vec{v} + \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}, \quad (11)$$

což je **Navierova-Stokesova rovnice**, kterou nezávisle na sobě odvodili v roce 1827 CLAUDE LOUISE M. H. NAVIER a v roce 1845 GEORGE GABRIEL STOKES. V této rovnici je oproti Eulerově rovnici hydrodynamiky na levé straně navíc třetí a čtvrtý člen. Jednotlivé členy rovnice představují:

1. člen ... představuje vnější zrychlení, které je důsledkem působení tíhové síly,
2. člen ... představuje zrychlení od plošné (tlakové) síly,
3. člen ... představuje zrychlení potřebné k překonání viskózního tření kapalin,
4. člen ... představuje zrychlení vlivem viskozity u stlačitelných kapalin,
5. člen ... představuje konvektivní zrychlení od setrvačné síly,
6. člen ... představuje lokální zrychlení od setrvačné síly.

U nestlačitelné kapaliny odpadá díky rovnici kontinuity $\text{div } \vec{v} = 0$ čtvrtý člen rovnice, v neviskózní kapalině přechází rovnice v Eulerovu rovnici hydrodynamiky.

Pomocí Navierovy-Stokesovy rovnice lze popsat klasickou hydrodynamiku. Na rozdíl od Eulerovy rovnice obsahuje člen $\eta \vec{\nabla}^2 \vec{v} \Delta V$, který vyjadřuje vnitřní tření v tekutině.

Navierova-Stokesova rovnice představuje nelineární diferenciální rovnici. Jejím řešením dostaneme rozdělení rychlostí v tekutině v závislosti na místě a čase ($\vec{v} = f(\vec{s}, t)$). Matematika nezná postup analytického řešení této rovnice, řešit lze pouze speciální případy.

Laminární proudění kolem kuličky

Viskózní kapaliny působí silou na každý předmět, který se v kapalině pohybuje. Lze vyšetřit například, jak popsat pád předmětu ve viskózní kapalině. Vlivem tíhové síly \vec{F}_g je předmět urychlován a jeho počáteční rychlost $v_0 = 0$ se kontinuálně zvětšuje. Jev trvá tak dlouho, až předmět přejde v pohyb rovnoměrný s konstantní rychlostí poklesu \vec{v} , tzn. zrychlení je nulové. Poté existuje rovnováha mezi dolů směřující tíhovou silou a vzhůru směřujícími silami – vzlakovou silou a silou tření. To můžeme matematicky vyjádřit jako $\vec{F}_{vz} + \vec{F}_T = \vec{F}_g$.

Je-li padajícím předmětem kulička, jejíž objem je $V = \frac{4}{3}\pi r^3$, můžeme vztah dále upravit:

$$\vec{F}_T = \vec{F}_g - \vec{F}_{vz} = m\vec{g} - \rho_k V\vec{g} = (\rho_{tel} - \rho_k)V\vec{g} = (\rho_{tel} - \rho_k)\frac{4}{3}\pi r^3 \vec{g} \quad (12)$$

Na základě experimentů s kuličkami různých velikostí a s použitím různých kapalin zjistíme, že třecí síla závisí na koeficientu η , konečné rychlosti \vec{v} a poloměru kuličky r , což vyjádříme pomocí vztahu

$$\vec{F}_T = -6\pi\eta r\vec{v}. \quad (13)$$

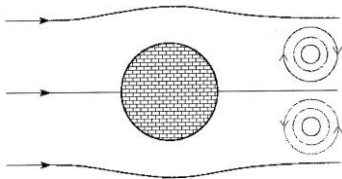
Rovnice (13) je tzv. **Stokesův zákon**.

Víry

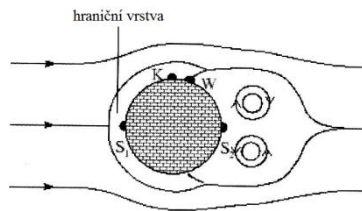
Charakteristický znak pro turbulence je vznik vírů. Představme si válec obtékáný tekutinou. Od určité rychlosti proudění v_G se začnou za válcem v oblasti tzv. mrtvé vody, tvořit stacionární víry s opačným směrem rotace. Jejich rychlost rotace lze určit podobně jako v případě fyziky tuhého tělesa jako $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$. U tekutin však platí, že různé objemové elementy mohou rotovat s různou úhlovou rychlostí, tzn. že $\vec{\omega}$ je funkcí místa $\vec{\omega} = \vec{\omega}(\vec{r})$. Víř lze rozdělit do dvou oblastí – jádro a oblast cirkulace.

Vysvětlení vzniku vírů provedeme pomocí válce, který je vložen do tekutiny, která se pohybuje zleva doprava a „naráží“ na těleso. V bodě S_1 (místo nárazu) je rychlost minimální, tzn. že podle Bernoulliho rovnice je statický tlak v tomto

místě maximální. Vytvoří se tlakový spád mezi body S_1 a K na vrcholu tělesa. Na vrcholu tělesa v bodě K je statický tlak minimální a rychlost maximální, zmenšená jen o vliv tření ($v < v_{\max}$). Nyní musí tekutina překonat existující nárůst tlaku na zadní straně válce, tj. mezi bodem K a bodem S_2 (viz obr. 2). Protože je $v < v_{\max}$, nestačí kinetická energie k tomu, aby bylo dosaženo bodu S_2 . Proudění má v bodě obratu W rychlost nulovou, protože však působí tlaková síla od bodu S_2 směrem k bodu K , jsou zbrzděné částičky tekutiny tlačeny proti směru proudění vnější vrstvy. Dochází ke stočení elementu tekutiny v okolí bodu W , čímž vznikne vír. Také na spodní straně válce se rozvíjí vír, ale s opačným směrem rotace. Oba víry se odpoutávají od válce a jsou nahrazovány novými. Vzniká tzv. Kármánova vírová cesta.



Obr. 1 Vznik vírů



Obr. 2 Mechanismus vzniku vírů

Změny tlaku a rychlosti před a za obtékaným tělesem lze odhadnout pomocí Bernoulliho rovnice. V oblasti laminárního proudění je celkový tlak $p_1 + \frac{\rho}{2}v^2$. Při dosažení bodu nárazu S_1 se minimalizuje rychlost a tlak má hodnotu $p_1 + \Delta p$. Podle Bernoulliho rovnice porovnáme obě části a máme $\Delta p = \frac{\rho}{2}v^2$. Na základě těchto úvah lze stanovit odporovou tlakovou sílu, která působí na obtékané těleso. Zřejmě závisí na velikosti obtékané plochy S a na tlaku Δp

$$F_{\text{ot}} \approx S \frac{\rho}{2} v^2$$

$$F_{\text{ot}} = c_D S \frac{\rho}{2} v^2, \quad (14)$$

kde koeficient c_D je tzv. koeficient tlakového odporu.

Celková odporová síla \vec{F}_c se skládá ze součtu normálové složky – tlaková odporová síla a tangenciální složky – tření $F_c = cS \frac{\rho}{2} v^2$, kde c je koeficient odporu, který závisí na tvaru tělesa (tzv. proudový odpor).

Uvnitř víru existuje oblast kolem jádra, kde se tekutina otáčí jako pevné těleso, tj. s konstantní úhlovou rychlostí $\vec{\omega}$. Obvodová rychlost rotace $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ roste lineárně se vzdáleností r od centra. Kromě toho všechny částice mají vlastní rotaci. Jestliže se částice otočí jednou kolem jádra, současně se otočí i jednou kolem vlastní osy. Pro oblast mimo jádro (pro $r > r_k$) rychlost rotace částek se vzrůstající vzdáleností klesá. Rotace je jen kolem jádra a nikoli kolem vlastní osy...oblast cirkulace.

Laminární proudění přechází v turbulentní při překročení tzv. kritické hodnoty Reynoldsova čísla. To závisí na viskozitě, rychlosti proudění tekutiny a geometrii proudění.

Tabulka 2: Kritické hodnoty Reynoldsova čísla

vzduch	Re	voda	Re
auto	10^7	lod'	10^7 až 10^{10}
dopravní letadlo	10^9	malá ryba	10^5
malý pták	$2 \cdot 10^7$	delfin	10^7

Reynoldsovo číslo je dáno vztahem

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu}, \quad (15)$$

kde v_s je střední rychlost kapaliny, d je charakteristický rozměr (např. při proudění v potrubí je to jeho vnitřní průměr) a ν je kinematická viskozita proudící kapaliny. Reynoldsovo číslo je bezrozměrové. Přechod laminárního proudění v turbulentní určuje kritické Reynoldsovo číslo. Pro proudění v potrubí se uvádí hodnota $Re_k = 2320$. Tedy při $Re < Re_k$ je proudění laminární a při $Re > Re_k$ je turbulentní. Přechod laminárního proudění v turbulentní závisí dále také na geometrickém tvaru průtočných částí, zaoblení hran na po-

čátečním úseku potrubí, drsnosti stěn potrubí, stupni turbulence přitékajícího proudu apod. Experimentálně se dosáhlo laminárního proudění i při větších hodnotách Reynoldsova čísla. Při proudění reálné kapaliny existuje tedy při $2\,320 < Re < 14\,000$ přechodová oblast, kdy se může podle konkrétních podmínek vyskytovat laminární i turbulentní proudění.

Hagenův-Poiseuilleův zákon [2]

Předpokládejme izotermické proudění nestlačitelné kapaliny s konstantní viskozitou v kruhovém potrubí. V předchozím textu byl odvozen vztah (7) vyjadřující rychlostní profil proudění v kapiláře. Lze psát:

$$v = \frac{i}{4\eta} (R^2 - r^2), \quad (16)$$

kde $i = \frac{\Delta p}{l} = \frac{dp}{dx}$ je měrný tlakový spád, l je délka potrubí, η je dynamická viskozita, R je poloměr potrubí a r je vzdálenost od osy potrubí. Rychlostním profilem laminárního proudění je parabola, v prostoru rotační paraboloid. Maximální rychlost je v ose potrubí ($r = 0$), tj.:

$$v_{\max} = \frac{i}{4\eta} R^2. \quad (17)$$

Střední rychlost proudění kapaliny můžeme určit z objemového průtoku. Pro elementární objemový průtok platí:

$$dQ_v = v dS = v 2\pi r dr = \frac{\pi i}{2\eta} \cdot (R^2 - r^2) r dr. \quad (18)$$

Integrací dostaneme:

$$Q_v = \int_0^R dQ_v = \frac{\pi i}{8\eta} R^4 = \frac{\pi}{128} \frac{\Delta p}{\eta l} d^4, \quad (19)$$

což je **Hagenova-Poiseuilleova rovnice**, kterou nezávisle na sobě odvodili v roce 1839 H. HAGEN a v letech 1840–1841 JEAN L. M. POISEUILLE. Odtud pro střední rychlost můžeme psát:

$$v_s = \frac{Q_v}{S} = \frac{i}{8\eta} R^2 = \frac{\Delta p}{32\eta l} d^2 = \frac{1}{2} v_{\max}, \quad (20)$$

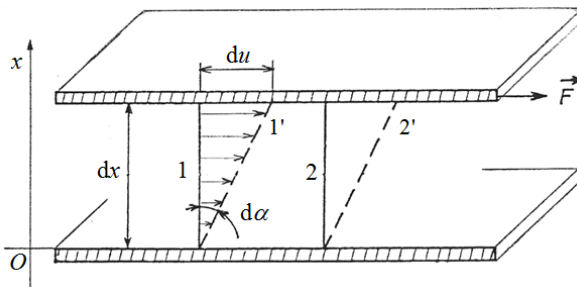
kde d je vnitřní průměr potrubí na délce l .

2 Newtonské kapaliny

V případě ideálně viskózního materiálu platí pro tečné napětí klasický Newtonův zákon

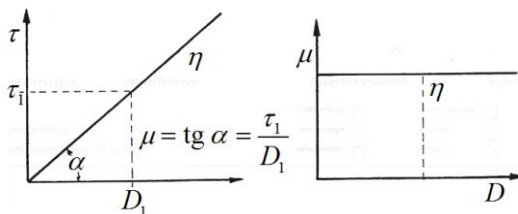
$$\tau = \eta \frac{du}{dx} = \eta D \quad (21)$$

kde součinitel η je **dynamická viskozita** charakterizující vnitřní tření newtonské kapaliny, du je vzájemná rychlost pohybu smykových rovin vzdálených o dx a D je tzv. **gradient rychlosti** (rychlost deformace, rychlost smyku), který charakterizuje tvarové změny v proudící tekutině (obr. 3).



Obr. 3. Rychlostní profil toku v kapalině mezi nepohyblivou a pohybující se deskou (kf.upce.cz/Reologie%20a%20reometrie%20kapalin.doc).

Dynamická viskozita je látkovou charakteristikou, jejíž hodnota závisí na teplotě a tlaku. U plynů s teplotou roste, u kapalin naopak klesá. V soustavě SI je jednotkou pascal sekunda [$\text{Pa} \cdot \text{s} = \text{kg/m} \cdot \text{s}$]. Dříve se udávala dynamická viskozita nejčastěji v poisech [P] nebo centipoisech [cP]. Platí $1 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 10 \text{ P}$. Převrácená hodnota dynamické viskozity $\varphi = 1/\eta$ se nazývá **fluidita** (tekutost).

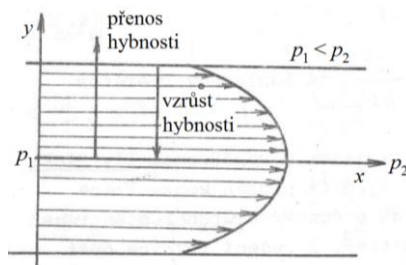


Obr. 4 Toková a viskozitní křivka newtonovských kapalin [3]

Podíl dynamické viskozity η a hustoty tekutiny ρ se nazývá **kinematická viskozita** $\nu = \eta/\rho$ [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$]. Starší jednotkou je stok [$\text{St} = \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$], platí $1 \text{ St} = 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Kinematickou viskozitu je výhodné užívat při popisu dějů závislejících jak na viskozitě, tak na hustotě, např. při popisu hydrodynamiky kapalin.

Tekutiny řídící se Newtonovým zákonem se označují jako **newtonské** a jsou to zpravidla nízkomolekulární látky. Viskozita těchto tekutin nezávisí na vazkém napětí a jejich toková křivka je znázorněna na obr. 4. Platí $\eta = \text{tg } \alpha$.

Vnitřní tření jako transportní jev



Obr. 5 Transport hybnosti [3]

Přenášenou veličinou je hybnost. Rovnice pro popis transportního jevu je zapsána jako diferenciální rovnice ve tvaru

$$dp = -\eta \frac{dv}{dy} dS dt, \quad (22)$$

kde $\frac{dv}{dy}$ je gradient rychlosti, η je koeficient vnitřního tření (koeficient dynamické viskozity). Znaménko minus vyjadřuje, že přenos hybnosti probíhá opačným směrem než vzrůst rychlosti.

Tok hybnosti je dán jako

$$\Phi_p = \frac{dp}{dt} = -\eta \frac{dv}{dy} dS = dF_t, \quad (23)$$

a rovná se síle tření mezi vrstvami tekutiny.

Zavedeme-li hustotu toku hybnosti vztahem

$$g_p = \frac{d\Phi_p}{dS} = -\eta \frac{dv}{dy} = \frac{dF_t}{dS} = \sigma_t \quad (24)$$

jde o tečnou sílu mezi vrstvami vztaženou na jednotku plochy, což je tečné napětí σ_t mezi vrstvami tekutiny. Existence tečného napětí σ_t je příčinou vnitřního tření tekutin.

Velikost vnitřního tření můžeme měřit silou F , které je zapotřebí, aby se deska plochy S pohybovala rovnoměrnou rychlostí v ve vzdálenosti z od klidné desky (stěny), je-li mezi nimi vyšetřovaná kapalina. Pro vyjádření této síly použijeme Newtonův vzorec

$$F = \eta S \frac{v}{z}$$

Po úpravě máme

$$F = \eta S \frac{dv}{dz}, \quad \frac{F}{S} = \tau \quad (25)$$

což určuje sílu připadající na jednotku plochy desky a udává tečné (tangenciální) napětí, které vzniká uvnitř tekutiny při jejím pohybu. Tangenciální napětí

$$\tau = \eta \frac{dv}{dz}$$

je přímo úměrné rychlostnímu spádu v daném místě. Jednotkou dynamické viskozity η je $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} = \text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2} = \text{Pa} \cdot \text{s}$.

Kinematickou viskozitu získáme podle vztahu $\nu = \frac{\eta}{\rho}$, tj. dynamickou viskozitu vydělíme hustotou kapaliny.

Vztahy, kde pracujeme s dynamickou viskozitou kapaliny:

$$Q = \frac{\pi}{8\eta} \frac{\Delta p}{l} r^4 \quad \text{Poiseuilleův (Hagenův) zákon}$$

Stokesův zákon – pro kouli má tvar $F = 6\pi\eta r v$

Na základě Stokesova zákona lze z rovnice rovnováhy sil působících na kuličku padající v kapalině získat vztah pro určení dynamické viskozity.

$$6\pi\eta r v_m = \frac{4}{3}\pi r^3(\rho - \rho_k)g,$$
$$\eta = \frac{2g}{9v_m}(\rho - \rho_k)r^2 \quad (26)$$

Vztah (26) je základem metody „padající kuličky“ pro měření viskozity.

3 Viskozimetry

Pro měření viskozity kapalin slouží tzv. viskozimetry. Rozlišuje různé metody pro měření viskozity:

- a) absolutní měření – z Poiseuilleova zákona, měříme všechny ostatní veličiny
- b) relativní měření – srovnání s kapalinou, jejíž dynamická viskozita je známa – Ostwaldův viskozimetr, Höpplerův viskozimetr

K měření viskozity se běžně používají průtokové, pádové a rotační viskozimetry, z nichž však pouze poslední typ a speciální kapilární viskozimetry umožňují dostatečně charakterizovat tokovou křivku neneutonských kapalin. Podmínkou správného měření je vždy laminárnost proudění v celém rozsahu měření a dobře definovaná geometrie toku (možnost určování D a τ) v případě neneutonských kapalin.

Průtokové viskozimetry

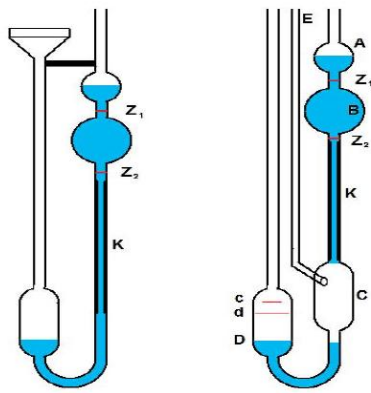
Měření těmito přístroji je založeno na Poiseuilleově rovnici pro laminární výtok kapaliny z kolmé trubice kruhového průřezu vlastní hmotností

$$\eta = \frac{\pi r h \rho g}{8Vl} \quad (27)$$

kde je r poloměr trubice, l – délka trubice, h – výška sloupce kapaliny, ρ - hustota kapaliny, g – tíhové zrychlení, t – doba toku, V – objem vyteklé kapaliny. Aby proudění bylo laminární, je nutno užívat při nízkých viskozitách kapilární trubice. V praxi se měření neprovádí absolutně, ale relativně na základě srovnání s referenční kapalinou mající známou viskozitu ν_0 např. podle vztahu

$$\nu = \frac{t}{t_0} \nu_0 \quad (28)$$

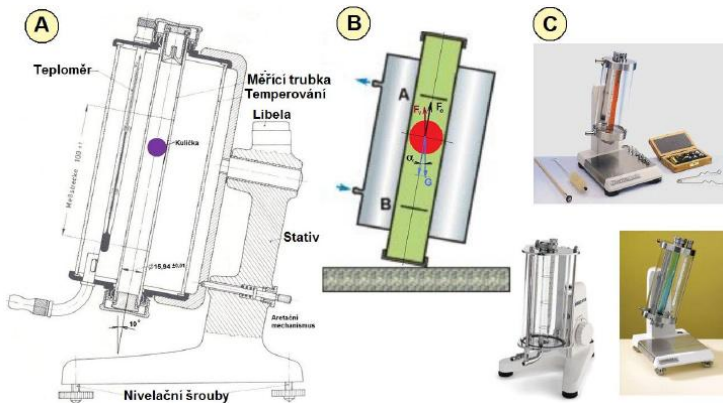
kde t , t_0 jsou doby výtoku zkoumané a referenční kapaliny. Nejznámějšími typy viskozimetrů jsou viskozimetry Englerův, Ostwaldův, Kohlův a Ubbelohdeův (obr. 6).



Obr. 6 Výtokové viskozimetry [3]

Tělískové viskozimetry

Měření těmito přístroji je založeno na měření rychlosti pádu známého tělíska (obvykle koule) v kapalině, jejíž viskozitu určujeme. Využíváme Stokesova zákona – viz rovnice (26).

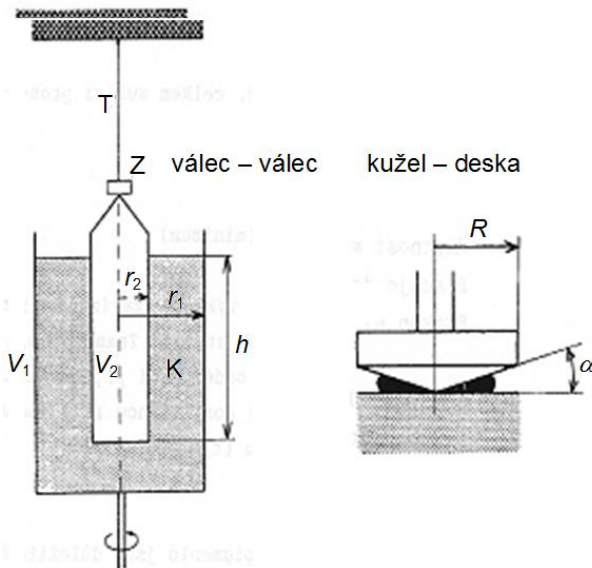


Obr. 7 Schéma Höpplerova kuličkového viskozimetru a některé vyráběné viskozimetry [3]

V laboratoři je nejčastěji používaným viskozimetrem tohoto typu viskozimetr Höpplerův. Kulička padá skleněnou trubicí uprostřed vnější nádoby. Trubice je skloněna od vertikály o 10° a má průměr jen o něco málo větší než je průměr koule (obr. 7).

Rotační viskozimetry

V tomto případě je vzorek podrobován smyku mezi dvěma definovanými plochami, z nichž jedna vykonává otáčivý pohyb a vyhodnocuje se brzdný účinek vzorku při různých rychlostech otáčení. Nejběžnější typ rotačního viskozimetru s dvěma sousými válci V_1 a V_2 , mezi kterými je měrná kapalina K , je schematicky znázorněn na obr. 8. Jeden z válců (v našem případě vnější) se při měření uvede do rotačního pohybu stálou úhlovou rychlostí ω a registruje se moment síly M působící přitom na vnitřní válec V_2 . V uvedeném případě se měří stočení torzního vlákna T , na kterém je zavěšen válec V_1 metodou světelného paprsku odraženého zrcátkem Z . V komerčních přístrojích se otáčivý moment měří zpravidla elektricky, což umožňuje jeho další snadné zpracování, popř. zápis.



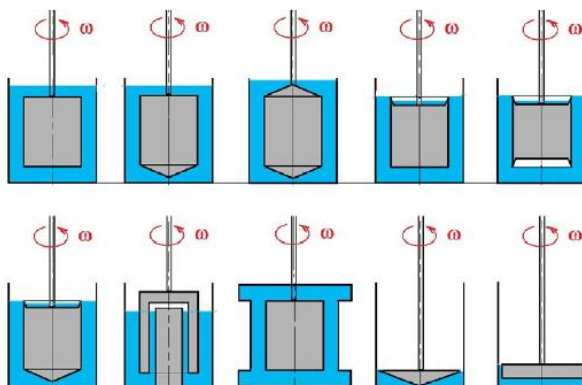
Obr. 8. Schéma základních typů uspořádání rotačních viskozimetrů

Viskozitu lze vypočítat pomocí vztahu

$$\eta = \frac{M \left(\frac{1}{r_1^2 - r_2^2} \right)}{4\pi h \omega} = A \frac{M}{\omega}, \quad (29)$$

kde A je přístrojová konstanta, r_1 a r_2 jsou poloměry válců, h je výška smýkané kapaliny. Rovnice byla odvozena za předpokladu stabilního laminárního toku ve štěrbině (Couetteův tok) a při zanedbání koncových a hranových efektů. Pro eliminaci jejich vlivu byla navržena řada korekcí. Určité problémy vyvolává také skutečnost, že v různých bodech měřené kapaliny ve válcové mezeře je různá rychlost smykové deformace (běžně 20 % mezi oběma povrchy). Dále je nutno počítat s ohřevem vzorku během měření, který se zvyšuje s viskozitou a rychlostí otáčení. Rotačním viskozimetrem tedy snadno získáme hodnoty napětí $\tau \approx M$ pro různé hodnoty rychlostního gradientu D , jehož hodnota je dána rychlostí otáčení a poloměrem válců (hodnoty jsou pro každé uspořádání tabelovány).

Souhrnně je možno o reometrech se souosými válci říci, že je k dispozici řada komerčních přístrojů nejrůznějšího provedení (obr. 9), rozsahů a předností, z nichž je nutno vybírat vždy podle konkrétních požadavků, vyplývajících hlavně ze struktury a typu viskozitní anomálie měřené kapaliny.



Obr. 9 Různé úpravy měrného prostoru rotačních viskozimetrů [3]

Místo dvou souosých válců se zvláště pro viskóznější kapaliny často užívá uspořádání kužel – deska (obr. 9). V obou případech se měřená kapalina dává do úzké štěrbině mezi dvě plochy, takže při měření se vystačí s malým množstvím kapaliny ($\approx 0,1$ ml). V tomto případě je celý vzorek podroben konstantní rychlosti smykové deformace a jsou potlačeny koncové a krajové efekty. Teplota vzorku je v důsledku velké chladicí plochy a tenké vrstvy velmi účinná. Nevýhodou je omezená použitelnost tohoto systému pro suspenze a disperze (větší částice narušují tokové poměry v klínové mezeře).

Vztah mezi smykovým napětím τ a momentem síly M je pro uspořádání kužel – deska s poloměrem podstavy kužele R dán rovnicí

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3} \quad (30)$$

a pro gradient rychlosti platí

$$D = \frac{\omega}{\alpha}, \quad (31)$$

kde α je úhel štěrbině v radiánech. Tokovou rovnicí neneutonských kapalin lze tedy tímto viskozimetrem určovat přímo z naměřených závislostí momentu síly na úhlové rychlosti. Platí

$$\eta = \frac{\tau}{D} = \frac{3M\alpha}{2\pi R\omega^3} = K \frac{M}{\omega}. \quad (32)$$

Vybranými typy rotačních viskozimetrů lze určovat viskozitu také tím způsobem, že necháme vnitřní válec konat torzní kmity uvnitř stojícího vnějšího válce, když předtím vhodně upravíme velikost jeho momentu setrvačnosti. Mluvíme potom o viskozimetru torzním. Viskozita se určí měřením útlumu kmitů kmitajícího válce.

4 Neneutronovské kapaliny, reologie

Vědní obor nazývaný **reologie** se zabývá studiem vnitřní reakce látek (pevných i tekutých) na působení vnějších sil resp. jejich deformovatelností a tokovými vlastnostmi. Souvislost mezi mikrostrukturou a reologickými vlastnostmi zkoumá mikroreologie. Pro potřeby chemického inženýrství má význam zejména fenomenologická reologie (makroreologie) kapalin, která na ně pohlíží jako na kontinuum a formuluje **zákonitosti viskózního toku**.

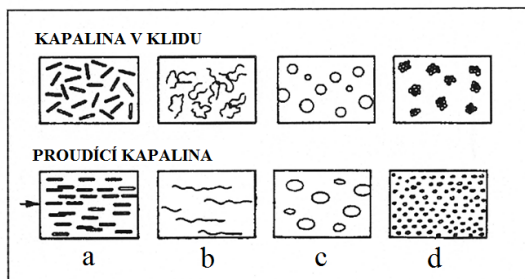
Reologické chování tekutých materiálů hraje důležitou roli v řadě technologických operací. Znalost základních reologických veličin, viskozity, meze toku a modulů pružnosti je potřebná nejen k charakterizování surovin, popř. produktů, ale i k řešení mnoha technických úloh a inženýrských výpočtů při navrhování, zdokonalování a kontrole různých výrobních a dopravních zařízení.

Matematickým vyjádřením tokových vlastností kapalin jsou **reologické stavové rovnice**, které zpravidla vyjadřují vztah mezi deformačním **smykovým (tečným, vazkým) napětím** τ a deformací kapaliny. Jejich grafickou podobou jsou **tokové křivky**.

Vedle newtonských kapalin existují i kapaliny reologicky složitější, které se Newtonovým zákonem neřídí. Označují se proto jako **neneutronovské kapaliny** a jsou to např. roztoky a taveniny polymerů, suspenze, různé pasty apod. Platí pro ně analogicky s Newtonovým zákonem rovnice

$$\tau = \eta D, \quad (33)$$

kde η je ovšem tzv. **zdánlivá viskozita**, která není látkovou konstantou, ale závisí na rychlosti deformace nebo tečném napětí. Některé příčiny jsou schematicky znázorněny na obr. 10.

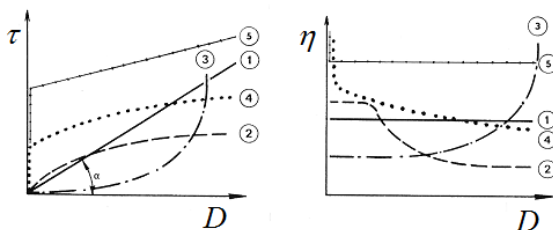


Obr. 10 Vliv toku na uspořádání částic v neneutronovské kapalině:
a) orientace, b) napřímění, c) deformace, d) rozmělnění [3]

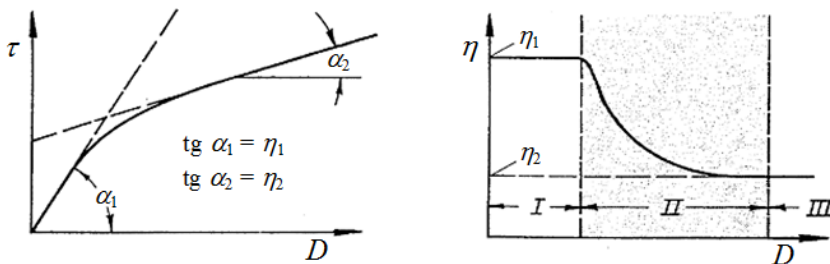
K charakterizaci toku neneutonských kapalin je proto nutno znát průběh závislosti $\eta = \eta(D)$ v širším intervalu D .

Základní typy neneutonských kapalin jsou:

a) **Pseudoplastické kapaliny**, jejichž zdánlivá viskozita se s rostoucím gradientem rychlosti zmenšuje (obr. 11). Podle průběhu tokové křivky se někdy rozlišují dvě podskupiny: pravé pseudoplastické kapaliny a **strukturně viskózní kapaliny**, u nichž lze stanovit dvě limitní hodnoty zdánlivé viskozity. Jsou to např. roztoky a taveniny polymerů, roztoky mýdel a detergentů, některé suspenze apod.



Obr. 11 Tokové a viskozitní charakteristiky některých neneutonských kapalin 1 – newtonská kapalina, 2 – strukturně viskózní kapalina, 3 – dilatantní kapalina, 4 – plastická kapalina (pseudoplastická s mezí toku) 5 – binghamská kapalina [3]



Obr. 12 Toková a viskozitní křivka strukturně viskózní kapaliny

Z technického hlediska je pseudoplastičita zpravidla vítanou vlastností poněvadž snižuje energetickou náročnost při míchání, toku kapalin potrubím apod.

b) **Dilatantní kapaliny**, jejichž zdánlivá viskozita roste s rostoucím gradientem rychlosti (viz obr. 11). Toto chování je poměrně řídké a bylo pozorováno v některých vysoce koncentrovaných suspenzích (např. v PVC plastisolech). Poněvadž zpravidla komplikuje technologické procesy, je žádoucí dilataci pokud možno potlačit změnou složení. K vyjádření průběhu tokových křivek uvedených nenewtonských kapalin se užívají rovnice empirické nebo poloempirické povahy, např. typu

$$D = K\tau^n, \quad (34)$$

kde K , n jsou empirické látkové parametry charakterizující vlastnosti toku nenewtonské kapaliny a závisejí pouze na teplotě. Parametr K se nazývá součinitel (koeficient) konzistence a parametr n je index (nebo exponent) toku ($n > 1$ pro pseudoplasticitu, $n < 1$ pro dilataci).

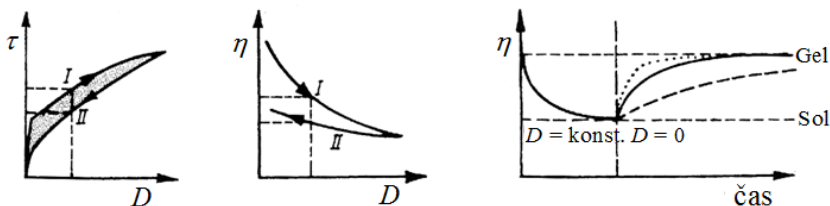
c) **Binghamské kapaliny**, tj. kapaliny s plastickou složkou deformace, u nichž dochází k toku až po překročení určitého prahového smykového napětí, tzv. meze toku (kluzu) τ_k (viz obr. 11, 12). Pro tyto plastické kapaliny platí

$$\tau - \tau_k = \eta_0 D \quad (35)$$

Patří sem např. koncentrované průmyslové a odpadní (splaškové) kaly, kašovitě suspenze křídla a vápna aj.

Rovněž u pseudoplastických a dilatačních kapalin může existovat varianta s mezním smykovým napětím (obr. 11). Typické plastické chování vykazují např. zubní pasty, čokoláda, rtěnky aj.

Existují také kapaliny s časově závislou složkou deformace, které mění zdánlivou viskozitu s dobou působení napětí. Jejich tokové křivky jsou hysterezní, průběh při zvyšování napětí se liší od průběhu při jeho snižování (obr. 13). Rozlišují se dva základní typy:



Obr. 13 Charakteristické křivky tixotropní kapaliny [9]

a) **Látky tixotropní**, u nichž zdánlivá viskozita klesá s prodlužující se dobou působení napětí. Tento typ chování je velmi výhodný např. pro nátěrové hmoty. Důležitá je znalost tixotropního chování např. pro stanovení spouštěcího příkonu míchadel.

b) **Látky reopektické**, jejichž zdánlivá viskozita během smykového namáhání s časem roste. Na rozdíl od tixotropie se s tímto chováním můžeme setkat jen zřídka (např. u suspenzí bentonitu).

Anomálie viskozity mohou být velmi různorodé a v praxi se můžeme setkat i s různými kombinacemi chování viskozního s elastickým (kapaliny viskoelastické nebo elastoviskozní). Do této skupiny kapalin se řadí např. velmi koncentrované suspenze a velmi koncentrované roztoky makromolekul.

Závěrem je třeba zdůraznit, že pro neneutronovské kapaliny (které se v průmyslu vyskytují velmi často) nemá pojem viskozity jako látkové konstanty fyzikální význam a je nutno jej nahradit tokovou křivkou v potřebném rozsahu tečných napětí. Vzhledem k možnosti různých anomálií nelze přitom spoléhat na hodnoty získané extrapolací. Údaj zdánlivé viskozity změřený na jednoduchém viskozimetru bez udání tečného napětí nebo rychlostního gradientu může sloužit pouze pro orientační srovnání konzistence neneutronovských kapalin stejného druhu měřená na stejných přístrojích za stejných podmínek.

Reometrie

Úkolem reometrie je experimentální stanovení funkční závislosti mezi tečným napětím a gradientem rychlosti pro daný vzorek kapaliny, tzn. závislosti zdánlivé viskozity na tečném napětí nebo gradientu rychlosti.

Pro měření tokových křivek neneutronovských kapalin je nutno používat průtokové kapilární viskozimetry s nastavitelným tlakovým spádem. Přímo měřitelné veličiny jsou pak objemový průtok V a tlakový spád Δp na měrné kapiláře s poloměrem R a délkou l . Z těchto hodnot lze vypočítat konzistenční proměnné τ_s , D_s a zdánlivou viskozitu podle rovnic

$$\tau_s = \frac{\Delta p R}{2l} \quad D_s = \frac{4V}{\pi R^3} \quad \eta = \frac{\tau_s}{D_s} = \frac{2\Delta p V}{\pi l R^2} \quad (36)$$

Potřebný tlakový spád se vytváří různou výškou sloupce měrné kapaliny, tlakem interního plynu nebo zatěžovaným pístem. Měří se buď objemový průtok (běžnější, méně náročný způsob) nebo tlakový spád (vyžaduje spolehlivé obje-

mové dávkování se stabilním výkonem). Přesnost měření závisí především na výběru správné kapiláry s dobře definovanými parametry a na měření tlakového rozdílu.

Přímým výsledkem měření na kapilárním reometru je soustava údajů tlakového spádu a k němu příslušného objemového průtoku. Jako první zpracování se provádí výpočet konsistenčních proměnných τ_s a D_s (případně i zdánlivé viskozity) a nakreslení tokové křivky (reogramu). Podle jejího tvaru pak je možno zvolit způsob interpolace reogramu některou rovnicí toku. V případě pseudo-plastických a dilatantních kapalin lze zpravidla uspět s jednoduchou mocninou rovnici, po jejíž integraci pro trubici kruhového průřezu lze odvodit rovnici

$$\tau_s = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n D_s \quad (37)$$

kteřá v logaritmických souřadnicích dá lineární závislost mezi τ_s a D_s , jejíž směrnice přímo poskytne index toku n . Z úseku na ose pořadnic pak můžeme zjistit i hodnotu K .

Obecné problémy reometrie neneutonských kapalin

Na prvním místě je třeba jmenovat práci se suspenzemi, která s sebou přináší problém nehomogenity měřeného vzorku. Jednou z příčin je sedimentace, která se škodlivě uplatňuje jak u přístrojů rotačních tak i průtokových. U rotačních reometrů k tomu přistupuje problém odstředování částic suspenze.

U rotačních i kapilárních viskozimetrů bylo také pozorováno odpuzování mezi stěnou přístroje a částicemi suspenze, což má za následek vznik mezivrstvy čisté kapaliny, takže dispergované částice se nepodílí na přenosu tečného napětí a výsledek měření je zkreslen. Tuto nesnáž, nazývanou skluz u stěny, lze odstranit změnou materiálu měřicího elementu, jeho odmagnetováním nebo úpravou jeho povrchu (odmaštění, zdrsnění). Podobný je problém v případě suspenzí s velkými kulovitými částicemi, které mají nízkou afinitu k povrchu stěn měřicího prostoru.

Je nutno počítat s rušivým vlivem tixotropie nebo reopexie poněvadž v takovém případě závisí výsledná toková křivka na době měření. Vždy před měřením reologických parametrů neneutonské kapaliny je proto nutné se přesvědčit, zda se nejedná o látku s časově závislou složkou deformační rychlosti. Velmi snadno se o tom lze přesvědčit v případě rotačního viskozimetru, neboť

mění-li se zdánlivá viskozita při konstantních otáčkách s časem, pak máme co činit s těmito jevy. V této souvislosti je třeba upozornit také na dva jevy, které se často u newtonských kapalin vyskytují a které je možno snadno zaměnit s tixotropií nebo reopexií. Některé roztoky přírodních makromolekulárních látek (např. želatiny) mění reologické parametry s časem samovolně, bez ohledu na působení tečného napětí. Druhým případem je nevratná změna struktury některých koloidních roztoků po určité době působení tečného napětí. V takovém případě je nutno stanovit, při jakých hodnotách D nebo τ dochází k nevratným změnám a tokové křivky je možno měřit jen pod touto hranicí.

Jako další rušivý jev se může vyskytnout navíjení vzorku na rotující části viskozimetru, což se projevuje zvláště u newtonských kapalin s elastickou složkou deformace.

Problém ohřevu vzorku u rotačních viskozimetrů byl již zmíněn, u kapilárních viskozimetrů nejsou s udržováním konstantní teploty problémy.

Pro měření reologických vlastností velmi hustých látek (až těst) bylo vyvinuto velké množství přístrojů označených jako konzistometry nebo penetrometry (i pro velmi viskozní látky zdánlivě pevného charakteru, např. mýdlo). Jejich cílem však bylo většinou pouze naměřit nějakou srovnávací hodnotu (tvárli-
vost, zpracovatelnost, tuhost). Jen některé z nich se hodí k měření fyzikálních reologických parametrů, např. dynamické viskozity řádově 10^9 Pa·s i více.

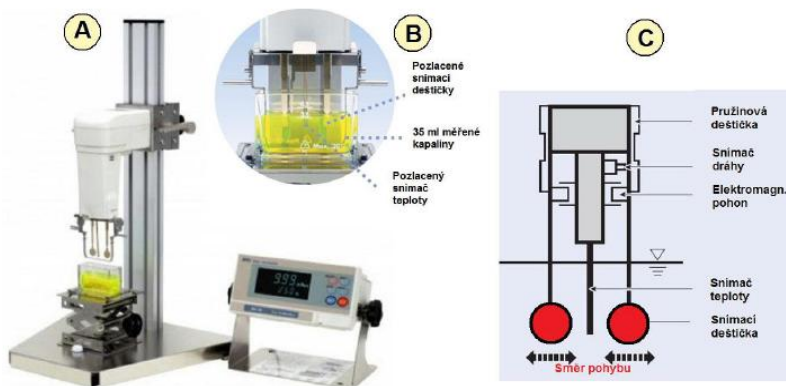
Postup měření:

1. Měření viskozity (dostatečně široký interval gradientu rychlosti)
2. Sestrojení tokové křivky ($\tau = f(D)$)
3. Klasifikace kapaliny – newtonovská – výpočet viskozity
4. Klasifikace kapaliny – ne-newtonovská – stanovení reologické stavové rovnice – určení součinitele konzistence K a indexu toku n

Vibrační viskozimetr

Viskozita je měřena pomocí detekce amplitudy dvou senzorů, které jsou ponořeny do kapaliny a měřením elektrického proudu potřebného k rozvibrování terčičků. Pokud jsou terčičky rozkmitány se stálou frekvencí, amplituda se mění v závislosti na brzdící třecí síle, kterou vyvolává kapalina. Vibrační viskozimetr kontroluje stálou velikost amplitudy. Protože brzdící síla je přímo úměrná vis-

kozitě, je proud (napětí) potřebné k udržení konstantních vibrací také přímo úměrné viskozitě vzorku. Vibrační viskozimetr měří proud potřebný k rozkmitání terčů s konstantní frekvencí a amplitudou a tím i viskozitu. Použitá frekvence je asi 30 Hz, rozsah měření je od 0,3 mPa · s do 10 000 mPa · s. Měření má přesnost 1 %. Vibrační viskozimetry SV jsou opatřeny dvěma terčů, které kmitají v režimu sinusové vlny. Terčů jsou uváděny do pohybu elektromagnetickou silou stejné frekvence jako je vlastní frekvence (rezonance), která je charakteristická pro každou strukturu, aby došlo k rezonanci měřeného systému. Pokud detekční jednotka kmitá, vytváří velkou reakční sílu na nosné jednotce pro terčů prostřednictvím pružin. Protože je každý terč poháněn v opačné fázi vzhledem k druhému terčů a přitom má stejnou frekvenci a amplitudu, reakční síla se vyruší a dostáváme stále sinusové kmity. Elektromagnetická jednotka kontroluje kmity terčů ve vzorku se stálou amplitudou, upravuje rezonanci detekční jednotky. Napájecí proud je detekován jako magnituda viskozity, která je přítomna mezi terčů a vzorkem. Koeficient viskozity je dán pomocí vztahu mezi proudem a magnitudou viskozity (koeficientem viskozity). [10]





Obr. 14 Vibrační viskozimetr [10, Holubová]

Měření viskozity je zpracováváno grafickým softwarem Win CT-Viscosity. Příklad obrazovky je na obr. 15.



Obr. 15 Obrazovka ze softwaru [10]

5 Experimentální část

Měření viskozity kapalin

Pohybují-li se dvě sousední vrstvy kapaliny, vzdálené od sebe o dy , různými rychlostmi v a $v+dv$, pak mezi nimi vzniká následkem vnitřního tření tečné napětí, které je přímo úměrné vzdálenosti dy sousedních vrstev, přičemž vzdálenost měříme kolmo ke směru rychlosti. Tečné napětí

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}.$$

Konstanta úměrnosti η vyjadřuje vlastnosti kapaliny a nazývá se dynamická viskozita. Jednotkou dynamické viskozity je $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$). V praxi se často ještě používá jednotka desetkrát menší, tzv. poise.

Při mnoha měřeních je snazší určovat tzv. kinematickou viskozitu ν , která je definována jako podíl dynamické viskozity a hustoty dané látky při téže teplotě

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}.$$

Jednotkou kinematické viskozity je $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. V praxi se ještě setkáme s jednotkou 10^4 krát menší, která má název stok. Pro kinematickou viskozitu olejů se v praxi používá jednotka Englerův stupeň. Pro převod kinematické viskozity z Englerových stupňů na jednotky soustavy SI lze použít Vogelova vztahu

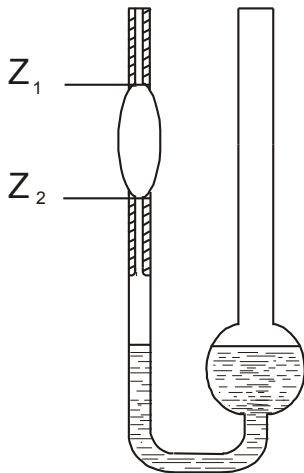
$$\nu = \frac{E}{10^6} 7,6^{(1-1/E3)} \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}.$$

Viskozita značně závisí na teplotě. U kapalin s rostoucí teplotou rychle klesá, u plynů roste přímo úměrně s odmocninou z absolutní teploty.

Viskozitu měříme přístroji, které se nazývají viskozimetry. Dělíme je na tři základní skupiny: výtokové, rotační a tělískové.

Měření viskozity kapalin kapilárními viskozimetry

Pomůcky: kapilární viskozimetr, automatické digitální stopky, destilovaná voda, etylalkohol, gumový balónek, teploměr



Kapilární viskozimetry patří mezi viskozimetry výtokové. Jsou založeny na Poiseuillově vztahu, podle něhož při ustáleném laminárním proudění kapaliny o viskozitě η proteče za dobu τ trubici délky l a poloměru r objem

$$V = \frac{\pi r^4}{8\eta} \frac{\tau}{l} p,$$

kde p je rozdíl tlaků na koncích trubice.

U kapilárních viskozimetrů vytéká kapalina vlivem vlastní tíhy, rozdíl tlaků p je tedy rovný hydrostatickému tlaku kapaliny, $p = h\rho g$. Pro výpočet dynamické viskozity pak dostáváme vztah

$$\eta = \frac{1}{V} \frac{\pi r^4}{8\ell} \tau h \rho g.$$

Stanovení délky a poloměru kapiláry i proteklého objemu by bylo obtížné, výška h sloupce kapaliny se během měření mění, měření viskozity nezávislou metodou by tedy bylo obtížné a nepřesné. Proto budeme měřit *srovnávací metodou*. Určíme dobu τ_1 , za kterou proteče kapilárou objem V zkoumané kapaliny, jejíž viskozitu η_1 měříme, a dobu τ_2 , za kterou proteče toutéž kapilárou stejný objem srovnávací kapaliny, jejíž viskozitu η_2 známe. Jsou-li ρ_1 , ρ_2 hustoty kapalin, pak za předpokladu, že počáteční rozdíl hladin h je u obou kapalin stejný, platí pro poměr viskozit

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\tau_1 \rho_1}{\tau_2 \rho_2}$$

a viskozita zkoumané kapaliny

$$\eta_1 = \frac{\tau_1 \rho_1}{\tau_2 \rho_2} \eta_2.$$

Nejjednodušším přístrojem k měření viskozity je Ostwaldův viskozimetr. Do širšího ramene trubice nalijeme měřenou kapalinu a hadičkou nasazenou na užší rameno trubice ji nasajeme nad horní značku Z_1 . Měříme dobu, za kterou kapalina proteče od horní značky Z_1 k dolní značce Z_2 .

Postup měření:

Ostwaldův viskozimetr upevníme do stojanu tak, aby kapilára byla ve svislé poloze. Do viskozimetru nalijeme zkoumanou kapalinu a zapojíme elektronický měřič doby průtoku. Nasáváme kapalinu tak dlouho, až se rozsvítí obě indikační diody polohy kapalinového sloupce (tj. až nad horní značku). Vytékající sloupec kapaliny automaticky při projití horní značkou spustí elektronické stopky, při průchodu polohou Z_2 se stopky automaticky zastaví. Měříme dobu τ_1 průtoku několikrát za sebou. Opakovaně měříme také teplotu kapaliny; teplota se během měření nesmí měnit, neboť závislost viskozity na teplotě je velmi výrazná. Dobu průtoku měříme nejméně desetkrát.

Jako srovnávací kapalinu použijeme destilovanou vodu. Při výměně kapalin viskozimetr důkladně vyčistíme, srovnávací kapalinou nejprve propláchneme a pak naplníme. Měření zapíšeme do vhodných tabulek, vypočteme pro každou kapalinu aritmetický průměr dob průtoku, stanovíme nejistoty měření. Hustoty měřené i srovnávací kapaliny určíme pomocí Mohrových vážek. Za předpokladu, že hustoty jsou změřeny se zanedbatelně malou chybou, vypočteme střední nejistotu výsledku podle vztahu

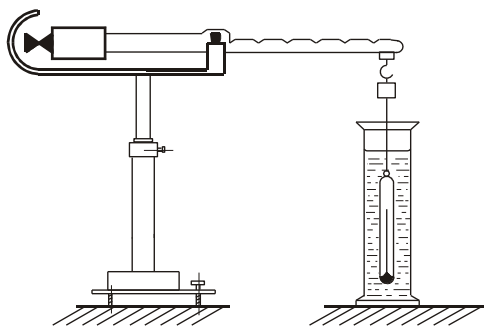
$$\delta\eta_1 = \eta_1 \sqrt{\left(\frac{\delta\tau_1}{\tau_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta\tau_2}{\tau_2}\right)^2}.$$

Viskozitu srovnávací kapaliny vyhledáme v tabulkách.

Měření hustoty kapalin Mohrovými vážkami.

Pomůcky: Mohrovy vážky s příslušenstvím, kádinky, teploměr, měřené kapaliny

Měření hustoty kapalin Mohrovými-Westphalovými vážkami je založeno na metodě ponorného tělíska. Mohrovy vážky jsou nerovnoramenné pákové váhy.



Na konci delšího ramene je zavěšeno skleněné tělísko (obvykle je to teploměr, který umožní okamžité určení teploty zkoumané kapaliny), rameno od tělíska k ose je rozděleno na 10 dílků. Je-li tělísko zavěšeno, jsou váhy v rovnováze. Ponoříme-li tělísko do kapaliny, rovnováha se poruší, neboť na tělísko působí vztlaková síla, jejíž velikost je přímo úměrná hustotě kapaliny. Rovnováhu obnovíme pomocí jezdců, které klademe na rozdělené rameno. Hmotnost jezdců je volena tak, že ponoříme-li tělísko do destilované vody o teplotě 4 °C, vyrovná se vztlaková síla největším jezdcem, zavěšeným přímo nad tělísko (10. dílek). Hmotnost jezdců je tedy rovna hmotnosti destilované vody (o teplotě 4 °C) stejného objemu, jako je objem tělíska. Hustota vody při této teplotě je $\rho_1 = 1\,000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Vyrovnáme-li při ponoření tělíska do jiné kapaliny vztakovou sílu zavěšením jezdců na n -tý dílek ramene, je hustota této kapaliny $\rho = n \cdot 100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. K pohodlnému a přesnějšímu vyvažování slouží další dva jezdcí, jejichž hmotnost je 10krát a 100krát menší než hmotnost základního jezdců. Hustotu kapaliny můžeme určit s přesností $1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Postup měření:

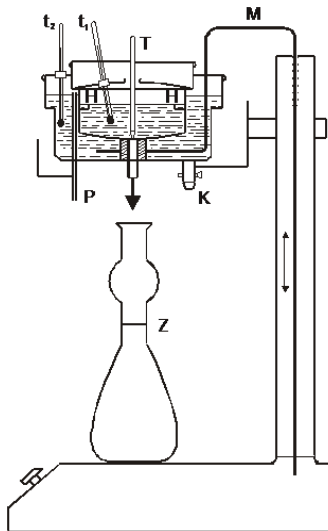
Váhy vyjme z skříňky a jejich podstavec zasuneme do bajonetového držáku na horní desce skříňky. Nasadíme vahadlo a na jeho delší rameno zavěšíme skleněné tělísko. Stavčím šroubem nastavíme nulovou polohu. Tělísko ponoříme do měřené kapaliny tak, aby bylo zcela ponořeno a nedotýkalo se stěn nádoby. Pomocí jezdců obnovíme rovnováhu a zapíšeme hustotu ρ' kapaliny. Změříme teplotu kapaliny.

Při přesnějším měření je třeba provést kontrolu Mohrových vážek. Tuto kontrolu provedeme změřením hustoty destilované vody. Je-li při ponoření tělíska do

destilované vody změřena její hustota ρ_1' , pak vážky jsou správné, shoduje-li se tato hustota s hodnotou udávanou pro danou teplotu tabulkami. Jestliže se hustota ρ_1' liší od správné hustoty ρ_1 , vypočteme správnou hustotu ρ měřené kapaliny ze vztahu $\rho = \frac{\rho_1}{\rho_1'} \rho'$. Při měření se nesmí teplota zkoumané kapaliny lišit od teploty vody více než o 4 °C, jinak by se projevila změna objemu tělíska.

Měření teplotní závislosti viskozity kapalin Englerovým viskozimetrem.

Pomůcky: Englerův viskozimetr, destilovaná voda, měřená kapalina (směs glycerínu a vody), teploměry, stopky



Englerův viskozimetr patří mezi výtokové viskozimetry a v praxi se velmi často používá pro měření kinematické viskozity olejů nebo jiných kapalin s velkou viskozitou. Englerovým viskozimetrem určíme kinematickou viskozitu kapaliny v Englerových stupních jako poměr doby T výtoku zkoumané kapaliny k době výtoku T_0 stejného objemu (200 cm³) destilované vody teploty 20 °C, $E = T/T_0$.

Na jednotky soustavy SI ji převedeme buď pomocí tabulek, nebo výpočtem podle Vogela vztahu. Při viskozitách větších než 7 °E můžeme použít přibližného vztahu

$$\nu = \frac{E}{10^6} 7,6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Základní součástí Englerova viskozimetru je nádobka uvnitř pozlacená, v jejímž dnu je výtoková trubice délky 20 mm; trubice má mírně kuželový tvar a její vnitřní průměr se zužuje z 2,9 mm na 2,8 mm. Trubice je shora uzavřena dřevěnou tyčinkou T. Nádobka je obklopena lázní, kterou lze elektrickým tope-

ním zahřát na žádanou teplotu. Kapalínu, jejíž viskozitu měříme, nalijeme do vnitřní nádoby tak, aby její hladina dosahovala ke třem hrotům, které jsou umístěny na stěnách nádoby. Vnitřní nádobka je opatřena teploměrem t_1 , pro měření teploty lázně slouží teploměr t_2 . Lázeň je promíchávána míchačkou. Výška hladiny lázně je omezena přepadovou trubicí, kapalinu z lázně vypouštíme kohoutem na spodu nádoby. K viskozimetru přísluší Englerova baňka, na níž je měřený objem vyznačen ryskou. Englerovým viskozimetrem budeme měřit závislost viskozity na teplotě. K měření je nutné vybrat kapalinu, jejíž viskozita je i při vyšších teplotách větší než viskozita destilované vody při teplotě 20 °C, neboť doba výtoky kapaliny T musí být větší než doba T_0 výtoky vody.

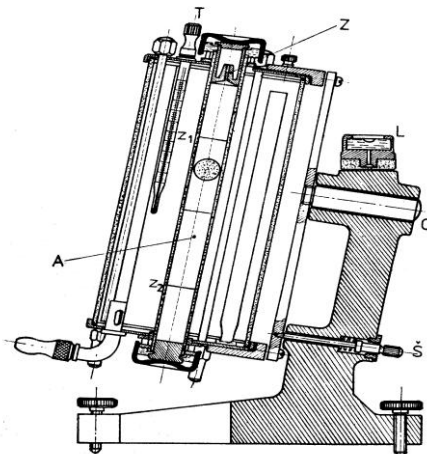
Postup měření:

Po uzavření vypouštěcího kohoutu nalijeme do vnější nádoby vodu asi 1 cm pod okraj přepadové trubice. Otvor vnitřní nádoby uzavřeme dřevěnou tyčinkou a nalijeme do ní destilovanou vodu tak, aby její hladina procházela třemi hroty. Polohu viskozimetru korigujeme stavěcími šrouby. Vnitřní nádobu uzavřeme víkem a zasuneme teploměry t_1 a t_2 . Pomocí elektrického topení nastavíme teplotu lázně na 20 °C a za stálého míchání vyčkáme, až se na tuto teplotu ohřeje voda ve vnitřní nádobce. Nyní otevřeme tyčinkou otvor ve dnu nádoby a současně spustíme stopky. Měříme dobu, za kterou nateče voda do Englerovy baňky po vyznačenou rysku. Tato doba má být 50 až 52 s. Měření opakujeme třikrát a jako správnou hodnotu doby T_0 vezmeme aritmetický průměr těchto tří dob, zaokrouhlený na 0,1 s.

Vnitřní nádobku potom vysušíme a naplníme zkoumanou kapalinou. Měříme dobu výtoky zkoumané kapaliny nejdříve při teplotě 20 °C, pak teplotu postupně zvyšujeme po 5 °C. Teplota lázně a zkoumané kapaliny se nesmí vzájemně lišit o více než 0,5 °C. Teplotu zkoumané kapaliny odečítáme vždy na začátku měření, na změny teploty během výtoky kapaliny nebereme zřetel. Měření provedeme pro nejméně pět různých teplot, pro každou teplotu změříme dobu výtoky T , vypočteme viskozitu v Englerových stupních a převedeme na jednotky $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Sestavíme tabulku a sestrojíme graf závislosti viskozity na teplotě kapaliny.

Měření viskozity kapalin Höpplerovým viskozimetrem.

Pomůcky: Höpplerův viskozimetr, termostat, stopky, teploměr



Höpplerův viskozimetr patří mezi nejpřesnější viskozimetry. Je to tělískový viskozimetr, není však založen na Stokesově zákonu. Hlavní částí tohoto přístroje je skleněná válcová trubice, na vnitřní ploše broušená, která svírá se svislým směrem úhel 10° . Trubice je naplněna zkoumanou kapalinou a uzavřena dutou zátkou. Trubice je obklopena vodní lázní s elektrickým ohřevem (možnost propojení na termostat). Přístroj nastavujeme do správné polohy stavěcími šrouby pomocí libely. Měření viskozity spočívá v měření doby pádu skleněné nebo kovové kuličky mezi dvěma značkami z_1 a z_2 na broušené trubici. Dynamickou viskozitu zkoumané kapaliny počítáme podle jednoduchého vztahu

$$\eta = \tau(\rho_1 - \rho_2)K \cdot 10^{-6} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2},$$

kde τ je změřená doba pádu, ρ_1 je hustota kuličky, ρ_2 je hustota zkoumané kapaliny, K je tzv. konstanta kuličky.

K přístroji je dodávána sada kuliček, jejichž hustoty ρ_1 a konstanty K (v jednotkách $10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$) jsou pro daný přístroj uvedeny ve zkušební listě. Ve zkušební listě dodávaném s přístrojem je rovněž uvedeno, jaká může být minimální doba pádu dané kuličky mezi značkami v trubici; při rychlejšímu pohybu

by již proudění kapaliny kolem kuličky nebylo laminární. U jednotlivých kuliček je rovněž uveden rozsah viskozit, pro něž je kulička vhodná.

Postup měření:

Vybereme kuličku podle předem odhadnuté viskozity zkoumané kapaliny. Vnitřní trubici viskozimetru naplníme zkoumanou kapalinou, vložíme do ní kuličku a trubici uzavřeme. Přebytečná kapalina vyteče otvorem v zátce. V trubici nesmí být vzduchové bublinky. Nyní připojíme vodní lázeň k termostatu. Stavěcími šrouby ustavíme viskozimetr do správné polohy. Zvolenou teplotu pro měření nastavíme na termostatu. Vodní lázeň musíme udržovat na zvolené teplotě několik minut, aby se prohřála kapalina i ve vnitřní trubici. Kapalinu ve vnitřní trubici promícháváme pomocí kuličky; uvolníme-li polohovací šroub, můžeme celým přístrojem otočit kolem osy a kulička se tedy může v trubici pohybovat oběma směry. Při promíchávání současně kontrolujeme, zda doba pádu kuličky mezi značkami není menší než minimální dovolená doba. Teplotu ve vnitřní trubici kontrolujeme rovněž pomocí doby pádu kuličky: při ustálení teploty je doba pádu konstantní. Při vlastním měření doby τ zachytíme přístroj šroubem v pevné poloze a vypneme termostat, aby nedocházelo k otřesům. Pro danou teplotu měříme dobu pádu kuličky pětkrát a vypočteme nejistotu měření. Potom teplotu zvyšujeme asi po 5ti stupních, pro každou teplotu měříme dobu pádu kuličky alespoň dvakrát. Sestrojíme graf závislosti viskozity na teplotě. Hustotu ρ_2 stanovíme některou z metod měření hustoty nebo vyhledáme v tabulkách. Hustota musí být stanovena velmi přesně, jinak bychom znehodnotili jinak přesné měření.

Charakteristika kuliček:

Č.	Hmotnost (g)	Hustota při 20 °C ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Kuličková konstanta K ($\text{mPa} \cdot \text{s} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	Rozsah měření viskozity ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)	Minimální doba pádu (s)
1	4,6028	2,227	0,019402	0,6-5	60
2	4,45151	2,225	0,073394	3-30	30
3	16,0565	8,143	0,128775	25-250	30
4	14,3948	8,138	1,18675	250-2500	30
5	9,9068	7,694	10,5025	2500-25000	30

Pro měření bude zařízení připraveno. Budete měřit teplotní závislost viskozity čistého glycerínu v intervalu 20–45 °C.

Upozornění:

Náplň viskozimetru nevyměňujte !!! Viskozimetr nerozšroubovávejte, nevyjímejte kuličku !

Konkrétní provedení:

A. Viskozimetr postavte na místo měření a pomocí libely upravte vodorovnou polohu.

B. Změřte několikrát (alespoň 3×) viskozitu při teplotě místnosti (bez zapnutého termostatu). Dobu pádu odměřujte přesně na stopkách. Při otáčení viskozimetru dejte pozor na zamotání hadic!

C. Zapněte oběhový termostat na č. 3 a pomocí vertexu nastavte vypínací teplotu cca 25 °C. Povolte horní zátku měřicí trubice viskozimetru, aby nedošlo uvnitř ke zvýšení tlaku. Vyčkejte na ustálení teploty (červená kontrolka termostatu nesvíí) a *lehce* utáhněte horní zátku viskozimetru. Odečtěte na teploměru v termostatu přesnou hodnotu teploty měření a znovu minimálně 3× změřte dobu pádu kuličky mezi krajními ryskami.

D. Bod 3 opakujte pro teploty 30, 35, 40 a 45 °C.

Pro výpočet použijte následující údaje:

hustota glycerínu při 20 °C: $\rho_{20} = 1\,260 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

součinitel objemové roztažnosti glycerínu $\gamma = 0,50 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$

hustota glycerínu při teplotě T : $\rho_T = \rho_{20} (1 - \gamma(T - 20 \text{ °C}))$


použitá kulička č. 4

Pro každou průměrnou hodnotu vypočtete směrodatnou odchylku výběru (SE-standard error) a závislost včetně znázornění SE (svislá úsečka nahoru a dolů od naměřeného průměru) vynesete do grafu jako závislost viskozity na teplotě.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x)^2}{n(n-1)}},$$

kde n znamená počet měření, x_i je naměřená hodnota a x je aritmetický průměr hodnot.

Příklad protokolu zpracovaného studenty

 Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta Katedra experimentální fyziky			
Protokol 8			
Téma: Viskozita kapalin			
Vypracovala: L. K.		Spolupracoval/i: V. H.	
Laboratorní podmínky:	Tlak: 1001 hPa	Teplota: 24,5 °C	Vlhkost vzduchu: 25 %
Datum měření: 28. 11. 2011			

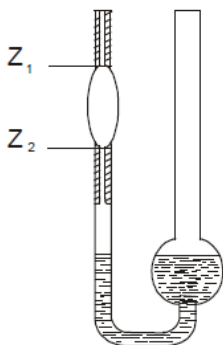
Téma měření: Viskozita kapalin

Úkol č. 1: Měření viskozity kapalin kapilárními viskozimetry

Pomůcky: kapilární viskozimetr, automatické digitální stopky, destilovaná voda, etylalkohol,

gumový balónek, teploměr.

Obr. 1: *Kapilární viskozimetr*



Kapilární viskozimetry patří mezi viskozimetry výtokové. Jsou založeny na Poisseuillově vztahu, podle něhož při ustáleném laminárním proudění kapaliny o viskozitě η proteče za dobu t trubicí délky l a poloměru r objem

$$V = \frac{\pi r^2}{8\eta} \frac{\tau}{l} p \quad (1)$$

kde p je rozdíl tlaků na koncích trubice.

U kapilárních viskozimetrů vytéká kapalina vlivem vlastní tíhy, rozdíl tlaků p je tedy rovný hydrostatickému tlaku kapaliny

$$p = h \rho g. \quad (2)$$

Pro výpočet dynamické viskozity pak dostáváme vztah

$$\eta = \frac{1}{V} \frac{\pi r^4}{8l} \tau h \rho g \quad (3)$$

Stanovení délky a poloměru kapiláry i proteklého objemu by bylo obtížné, výška h sloupce kapaliny se během měření mění, měření viskozity nezávislou metodou by tedy bylo obtížné a nepřesné. Proto budeme měřit srovnávací metodou. Určíme dobu t_1 , za kterou proteče kapilárou objem V zkoumané kapaliny, jejíž viskozitu η_1 měříme, a dobu t_2 , za kterou proteče toutéž kapilárou stejný objem srovnávací kapaliny, jejíž viskozitu η_2 známe. Jsou-li ρ_1 , ρ_2 hustoty kapalin, pak za předpokladu, že počáteční rozdíl hladin h je u obou kapalin stejný, platí pro poměr viskozit

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{\tau_1 \rho_1}{\tau_2 \rho_2} \quad (4)$$

a viskozita zkoumané kapaliny je

$$\eta_1 = \frac{\tau_1 \rho_1}{\tau_2 \rho_2} \eta_2 \quad (5)$$

Nejjednodušším přístrojem k měření viskozity je Ostwaldův viskozimetr. Do širšího ramene trubice nalijeme měřenou kapalinu a hadičkou nasazenou na

užší rameno trubice ji nasajeme nad horní značku Z_1 . Měříme dobu, za kterou kapalina proteče od horní značky Z_1 k dolní značce Z_2 .

Postup měření:

- Ostwaldův viskozimetr upevníme do stojanu tak, aby kapilára byla ve svislé poloze.
- Do viskozimetru nalijeme zkoumanou kapalinu a zapojíme elektronický měřič doby průtoku.
- Nasáváme kapalinu tak dlouho, až se rozsvítí obě indikační diody polohy kapalinového sloupce (tj. až nad horní značku). Vytékající sloupec kapaliny automaticky při projití horní značkou spustí elektronické stopky, při průchodu polohou Z_2 se stopky automaticky zastaví.
- Měříme dobu τ_1 průtoku několikrát za sebou.
- Opakovaně měříme také teplotu kapaliny. Teplota se během měření nesmí měnit, neboť závislost viskozity na teplotě je velmi výrazná.
- Dobu průtoku měříme nejméně desetkrát.
- Jako srovnávací kapalinu použijeme destilovanou vodu. Při výměně kapalin viskozimetr důkladně vyčistíme, srovnávací kapalinou nejprve propláchneme a pak naplníme.
- Měření zapíšeme do vhodných tabulek, vypočteme pro každou kapalinu aritmetický průměr dob průtoku, stanovíme nejistoty měření.
- Hustoty měřené i srovnávací kapaliny určíme pomocí Mohrových vážek. Za předpokladu, že hustoty jsou změřeny se zanedbatelně malou chybou, vypočteme střední nejistotu výsledku podle vztahu

$$\delta\eta_1 = \eta_1 \sqrt{\left(\frac{\delta\tau_1}{\tau_1}\right)^2 + \left(\frac{\delta\tau_2}{\tau_2}\right)^2} \quad (6)$$

Viskozitu srovnávací kapaliny vyhledáme v tabulkách.

Realizace měření a soubor výsledků

Tabulka 1 – Měření doby průtoku líhu

N	t [s]	Δ	Δ^2
1	16,23	-0,14	0,0196
2	15,45	-0,92	0,8464
3	15,38	-0,99	0,9801
4	18,14	1,77	3,1329
5	18,82	2,45	6,0025
6	15,29	-1,08	1,1664
7	16,44	0,07	0,0049
8	16,46	0,09	0,0081
9	15,24	-1,13	1,2769
10	16,29	-0,08	0,0064
	16,37		0,39

Doba průtoku líhu je $\tau = (16,4 \pm 0,4)$ s.

Tabulka 2 – Měření doby průtoku destilované vody

N	t [s]	Δ	Δ^2
1	17,83	4,04	16,3216
2	14,85	1,06	1,1236
3	13,92	0,13	0,0169
4	12,75	-1,04	1,0816
5	13,76	-0,03	0,0009
6	12,88	-0,91	0,8281
7	13,26	-0,53	0,2809
8	12,70	-1,09	1,1881
9	12,83	-0,96	0,9216
10	13,10	-0,69	0,4761
	13,79		0,5

Doba průtoku destilované vody je $\tau = (13,8 \pm 0,5)$ s.

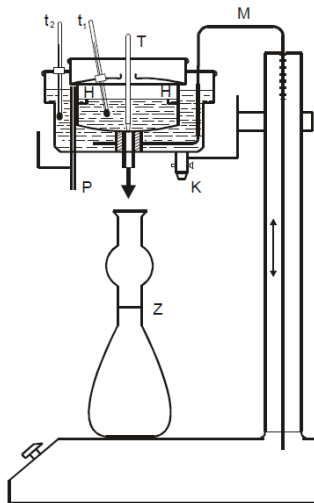
Ze vztahu (5) a tabulkových hodnot pro hustotu vody, lihu a ze známé viskozity vody vypočítáme viskozitu lihu: $\eta = 0,001\,065 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$

Ze vztahu (6) je pak chyba měření: $\delta\eta_1 = 0,046 \cdot 10^{-3}$

Viskozita lihu je $\eta_1 = (1,07 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$.

Úkol č. 2: Měření teplotní závislosti viskozity kapalin Englerovým viskozimetrem

Pomůcky: Englerův viskozimetr, destilovaná voda, měřená kapalina (směs glycerínu a vody), teploměry, stopky.



Obr. 2: Englerův viskozimetr

Englerův viskozimetr patří mezi výtokové viskozimetry a v praxi se velmi často používá pro měření kinematické viskozity olejů nebo jiných kapalin s velkou viskozitou. Englerovým viskozimetrem určíme kinematickou viskozitu kapaliny v Englerových stupních jako poměr doby T výtoku zkoumané kapaliny k době výtoku T_0 stejného objemu (200 cm^3) destilované vody teploty $20 \text{ }^\circ\text{C}$, $E = T/T_0$. Na jednotky soustavy SI ji převedeme buď pomocí tabulek nebo

výpočtem podle Vogelova vztahu. Při viskozitách větších než $7 \text{ }^\circ\text{E}$ můžeme použít přibližného vztahu

$$\nu = \frac{E}{10^6} 7,6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \quad (7)$$

Základní součástí Englerova viskozimetru je nádobka uvnitř pozlacená, v jejímž dnu je výtoková trubice délky 20 mm; trubice má mírně kuželový tvar a její vnitřní průměr se zužuje z 2,9 mm na 2,8 mm. Trubice je shora uzavřena dřevěnou tyčinkou T. Nádobka je obklopena lázní, kterou lze elektrickým topením zahřát na žádanou teplotu. Kapalinu, jejíž viskozitu měříme, nalijeme do vnitřní nádoby tak, aby její hladina dosahovala ke třem hrotům, které jsou umístěny na stěnách nádoby. Vnitřní nádobka je opatřena teploměrem t_1 , pro měření teploty lázně slouží teploměr t_2 . Lázeň je promíchávána míchačkou. Výška hladiny lázně je omezena přepadovou trubicí, kapalinu z lázně vypouštíme kohoutem na spodu nádoby. K viskozimetru přísluší Englerova baňka, na níž je měřený objem vyznačen ryskou. Englerovým viskozimetrem budeme měřit závislost viskozity na teplotě. K měření je nutné vybrat kapalinu, jejíž viskozita je i při vyšších teplotách větší než viskozita destilované vody při teplotě $20 \text{ }^\circ\text{C}$, neboť doba výtoky kapaliny T musí být větší než doba T_0 výtoky vody.

Postup měření:

- Po uzavření vypouštěcího kohoutu nalijeme do vnější nádoby vodu asi 1 cm pod okraj přepadové trubice. Otvor vnitřní nádoby uzavřeme dřevěnou tyčinkou a nalijeme do ní destilovanou vodu tak, aby její hladina procházela třemi hroty.
- Polohu viskozimetru korigujeme stavěcími šrouby. Vnitřní nádobu uzavřeme víkem a zasuneme teploměry t_1 a t_2 .
- Pomocí elektrického topení nastavíme teplotu lázně na $20 \text{ }^\circ\text{C}$ a za stálého míchání vyčkáme, až se na tuto teplotu ohřeje voda ve vnitřní nádobce.
- Nyní otevřeme tyčinkou otvor ve dnu nádoby a současně spustíme stopky. Měříme dobu, za kterou nateče voda do Englerovy baňky po vyznačenou rysku. Tato doba má být 50 až 52 s. Měření opakujeme třikrát a jako správnou hodnotu doby T_0 vezmeme aritmetický průměr těchto tří dob, zaokrouhlený na 0,1 s.

- Vnitřní nádobku potom vysušíme a naplníme zkoumanou kapalinou.
- Měříme dobu výtoku zkoumané kapaliny nejdříve při teplotě 20 °C, pak teplotu postupně zvyšujeme po 5 °C. Teplota lázně a zkoumané kapaliny se nesmí vzájemně lišit o více než 0,5 °C. Teplotu zkoumané kapaliny odečítáme vždy na začátku měření, na změny teploty během výtoku kapaliny nebereme zřetel.
- Měření provedeme pro nejméně pět různých teplot, pro každou teplotu změříme dobu výtoku T , vypočteme viskozitu v Englerových stupních a převedeme na jednotky $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.
- Sestavíme tabulku a sestrojíme graf závislosti viskozity na teplotě kapaliny.

Realizace měření a soubor výsledků

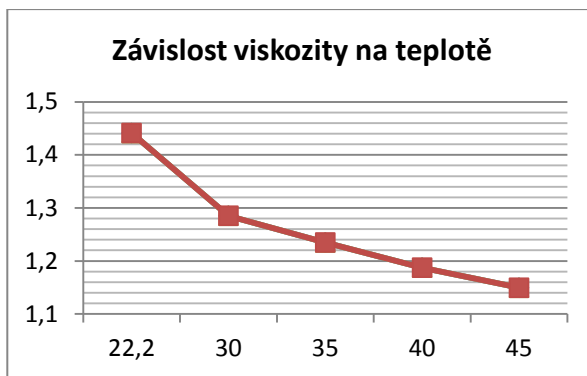
Tabulka 1 – Měření doby průtoku vody

N	T [s]	Δ	Δ^2
1	46,97	-0,23	0,053
2	47,35	0,15	0,0225
3	47,28	0,08	0,0063
	47,20		0,027

Doba průtoku vody je $t = (47,20 \pm 0,03)$ s.

Tabulka 2 – Měření doby průtoku glycerolu v závislosti na teplotě

t [°C]	T [s]	ν [E]
22,2	68,82	1,441 102
30	60,66	1,285 169
35	58,28	1,234 746
40	56,04	1,187 288
45	54,25	1,149 364



Graf 1 Závislost viskozity na teplotě kapaliny

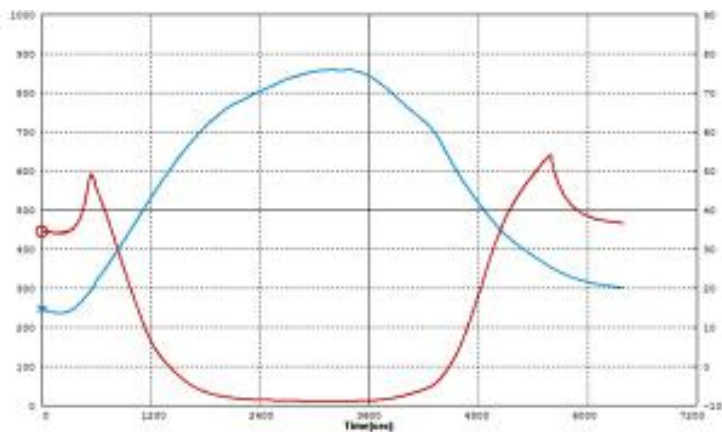
Závěr

V úloze č. 1 jsme z hodnot doby průtoku vody a lihu vypočítali viskozitu lihu, tedy hodnotu $\eta_l = (1,07 \pm 0,05) \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$. Srovnáme-li tuto hodnotu s hodnotou v tabulkách $\eta_{\text{lihu}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-2}$. Vidíme, že došlo k drobné odchylce způsobené nepřesností měření.

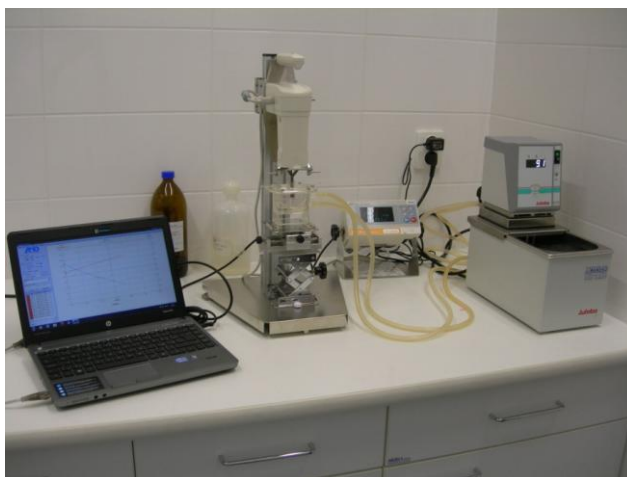
Ve druhé úloze jsme určovali závislost viskozity látky na její teplotě. Z grafu č. 1 a tabulky č. 2 lze vidět, že s rostoucí teplotou viskozita kapaliny velmi rychle klesá.

Měření viskozity vibračním viskozimetrem

Příkladem ne-newtonovské kapaliny je např. sprchový gel. Je to pseudoplastická kapalina. Měření provádíme ve dvou krocích – 1. Kalibrace viskozimetru pomocí etalonu viskozity, 2. Vlastní měření. K viskozimetru připojíme oběhový termostat, který umožňuje sledovat závislost viskozity na teplotě. V průběhu měření vzorek střídavě zahříváme a ochlazujeme (rozsah teplot asi 70 °C). Výstupem měření je graf závislosti viskozity na čase, druhá z křivek udává závislost dynamické viskozity na teplotě. Dynamická viskozita je vynášena v jednotkách Pa · s, čas v sekundách, teplota ve °C. Z grafu lze vidět „abnormální“ chování kapaliny při zahřívání – oproti newtonovským kapalinám viskozita s rostoucí teplotou roste.



Obr. 16 Graf závislosti dynamické viskozity na teplotě v čase



Obr. 17 Uspořádání experimentu

Literatura

- [1] Brdička, M., Samek, L., Sopko, B.: Mechanika kontinua, Academia, Praha 2000.
- [2] Duda, J.: Mechanika tekutin. Rigorózní práce. PšF UP Olomouc 2010.
- [3] Janalík, J.: Viskozita tekutin a její měření. VŠBTU, fakulta strojní Ostrava, 2010.
- [4] Havránek, A.: Reologie a její aplikace na biolátky
<http://noveltrends4.ft.utb.cz/programme.html>
- [5] Holubová, R.: Molekulová fyzika a termodynamika. VUP, Olomouc 2012.
- [6] Springer handbook of experimental fluid mechanics, Cameron Tropea, Alexander L. Yarin, John F. Foss, Publisher: Springer, 9 October 2007, ISBN 3540251413, ISBN 978-3540251415, p. 676
- [7] Springer handbook of experimental fluid mechanics, Cameron Tropea, Alexander L. Yarin, John F. Foss, Publisher: Springer, 9 October 2007, ISBN 3540251413, ISBN 978-3540251415, p. 661.
- [8] Rheology of Fluid and Semisolid Foods: Principles and Applications, M. A. Rao, Publisher: Springer, 2nd edition, 28 August 2007, ISBN 0387709290, ISBN 978-0387709291, p. 8.
- [9] http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/kontinuum/2_5
- [10] Users' Handbook Users' Handbook, SVseries Sine-wave Vibro Viscometer Version 1.12E October 2006. International Div., A&D Company, Limited.

RNDr. Renata Holubová, CSc.

Základy reologie a reometrie kapalin

Výkonný redaktor prof. RNDr. Zdeněk Dvořák, DrSc.

Odpovědná redaktorka Mgr. Jana Kopečková

Technická redakce doc. RNDr. Oldřich Lepil, CSc.

Grafické zpracování obálky Jiří Jurečka

Vydala a vytiskla Univerzita Palackého v Olomouci,

Křížkovského 8, 771 47 Olomouc

www.vydavatelstvi.upol.cz

www.e-shop.upol.cz

vup@upol.cz

1. vydání

Olomouc 2014

Ediční řada – Studijní opora

ISBN 978-80-244-4178-8

Neprodejná publikace

VUP 2014/539