

12. VISKOZITA A POVRCHOVÉ NAPĚTÍ

12.1 TEORETICKÝ ÚVOD

V proudící reálné tekutině se projevuje mezi elementy tekutiny vnitřní tření. Síly tření způsobí, že rychlejší vrstva tekutiny se snaží zrychlit vrstvu pomalejší a ta naopak zpomalovat vrstvu rychlejší. Podíl třecí síly a plošky, na kterou síla působí, označujeme jako tečné napětí τ . Schematické znázornění rychlostních poměrů v tekutině je na obr. 1. Vztah mezi tečným napětím a změnou rychlosti můžeme v řadě případů popsat lineární závislostí, v níž koeficient úměrnosti se nazývá **dynamická viskozita**. Dynamická viskozita je definována vztahem

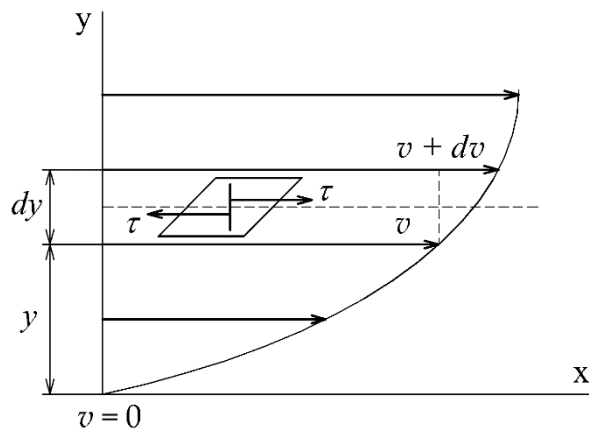
$$\tau = \eta \frac{dv}{dy}, \quad [\eta] = \text{Pa} \cdot \text{s}, \quad (1)$$

kde $\frac{dv}{dy}$ je velikost rychlostního spádu (rychlostní gradient) ve směru kolmém na rychlost.

V mechanice tekutin se zavádí ještě **kinematická viskozita** podle vztahu

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad [\nu] = \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}, \quad (2)$$

v němž ρ je hustota tekutiny.



Obr. 1

Dynamická viskozita všech tekutin závisí na teplotě, pro kapaliny s růstem teploty výrazně klesá, pro plyny při zvyšování teploty dynamická viskozita roste. Viskozita reálných kapalin může být funkcí rychlostního spádu. Grafické vyjádření závislosti tečného napětí na rychlostním spádu se nazývá **reogram** a pro některé typy látek je na obr. 2. Hodnoty viskozity jsou uvedeny v tab. 1. Tekutiny, pro něž je reogramem přímka procházející počátkem, mají při stálé teplotě a tlaku viskozitu konstantní, nezávislou na rychlostním spádu. Jsou označovány jako tekutiny **newtonské** (normální). Patří mezi ně např. voda, minerální oleje, benzin, líh atd. V případě, že reogram není lineární, tekutiny se nazývají **nenewtonské** (anomální). V tomto případě se zavádí viskozita pro určitý rychlostní spád. Označuje se jako **ekvivalentní viskozita**, a představuje ji směrnice tečny v daném bodě reogramu.

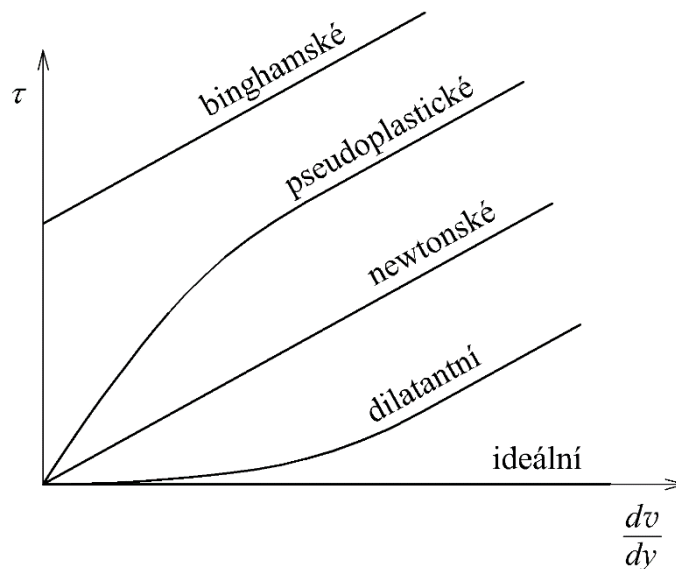
Tabulka 1

orientační hodnoty dynamické viskozity při 20 °C	
látka	viskozita látky [mPa·s]
petrolej	0,65
voda	1,0
ovocná šťáva*	2 – 5
smetana*	10
olivový olej	100
med*	10 ⁴
dehet*	10 ⁶
asfalt*	10 ⁸

* u těchto neneutonských tekutin uvedené hodnoty viskozity platí pouze pro určitý rychlostní spád

Podle průběhu reogramů dělíme neneutonské tekutiny na

1. látky **plastické** (binghamské) – za běžných podmínek nevykazují tekutost, vyžadují překročení určité meze tečného napětí, aby došlo k tečení (kašovitá suspenze, kaly, vápno),
2. látky **pseudoplastické** – při malých rychlostních spádech mají anomální chování a při větších se chovají jako tekutiny newtonské (zředěná suspenze),
3. látky **dilatantní** – viskozita se se stoupajícím tečným napětím zvětšuje, látky snadno sedimentují (mokrý písek),
4. látky **tixotropní** – se zvyšujícím se tečným napětím viskozita klesá (jogurt, tixotropní barvy – pod tlakem štetce se stávají snadno roztíratelné),
5. látky **reopexní** – vlivem zvyšujícího se tečného napětí viskozita stoupá (suspenze, sádry, šlehaný bílek).



Obr. 2

S dynamickou viskozitou se setkáváme při vyjádření odporové síly působící na těleso pohybující se v tekutém prostředí. Této skutečnosti se využívá pro měření dynamické viskozity tekutin pomocí přístrojů, které se nazývají **viskozimetry**. Podle použitého principu se rozlišují tyto základní typy:

Kapilární viskozimetry využívají rovnice vyjadřující závislost množství kapaliny proteklého za určitý čas tenkou trubicí známých rozměrů na viskozitě měřené kapaliny. Tyto přístroje se

vyrábějí jak v nejjednodušším provedení (např. pro orientační určování viskozity nátěrových hmot), tak v přesném a velmi přesném provedení (přesnost až 0,2 %), vhodném pro měření jak za nízkých tak i za vysokých teplot.

Rotační viskozimetry jsou založeny na měření síly přenášené tokem kapaliny z jedné plochy viskozimetru na druhou. Obvyklé provedení sestává ze dvou souosých válců, mezi kterými je měřená kapalina. Jeden z válců se uvede do rotačního pohybu se stálou úhlovou rychlostí a měří se moment síly působící na druhý válec.

Rotační viskozimetry byly v posledních letech technicky velmi zdokonaleny. Špičkové přístroje měří viskozitu v rozsahu tří řádů s přesností 1 % a reprodukovatelností 0,1 % v teplotním rozsahu 0 – 100 °C. Přístroje jsou doplněny elektronickým zařízením umožňujícím programovat měření, měřit ve velkém rozsahu otáček válce, vykreslovat reogramy, tisknout výsledky, napojit viskozimetr na počítačový měřicí systém apod.

Tělískové viskozimetry jsou přístroje, které určují viskozitu z rychlosti pádu vhodného tělíška v měřené kapalině. Princip této metody je podrobněji vysvětlen v návodu k laboratorní úloze č. 13. Tělískové viskozimetry patří mezi levnější přístroje, lze s nimi určovat viskozitu obvykle v rozsahu pouze jednoho řádu a to s přesností až 1 %, která je dosažitelná pouze za předpokladu, že s odpovídající přesností určíme i hustotu měřené kapaliny a její teplotu.

STANOVENÍ VISKOZITY STOKESOVOU METODOU

ÚLOHA č. 13

Způsob měření:

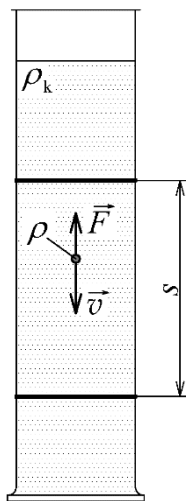
Na kuličku průměru d pohybující se v tekutině (obr. 3) rychlostí \vec{v} působí tekutina silou \vec{F} , jejíž velikost závisí na součiniteli odporu C , který je určen tvarem tělesa a stavem proudění kapaliny. Pro malé rychlosti kuličky platí pro velikost síly F Stokesův vzorec

$$F = 6\pi\eta rv \quad , \quad (3)$$

kde η je dynamická viskozita, r je poloměr kuličky. Platí-li Stokesův zákon, můžeme pro součinitel odporu C napsat jednoduchý vztah

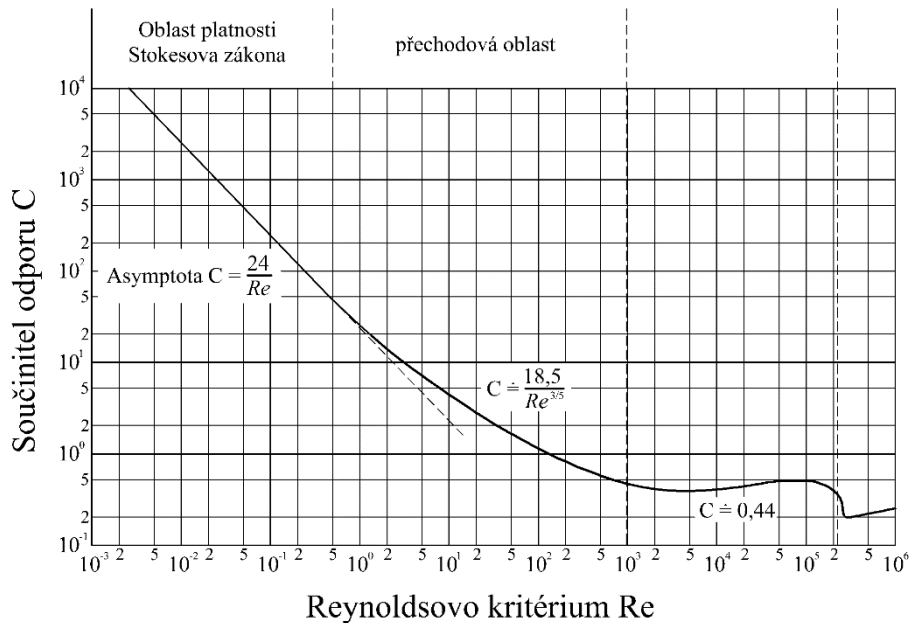
$$C = \frac{24}{\text{Re}} \quad (4)$$

kde $\text{Re} = \frac{vd}{\nu}$ a ν je kinematická viskozita. Re je Reynoldsovo číslo, které se užívá pro charakterizaci proudění.



Obr. 3

Mezi součinitelem proudění C a Reynoldsovým číslem Re existuje v oboru platnosti Stokesova zákona nepřímá úměrnost daná vztahem (4), která pro logaritmy veličin přechází v závislost lineární. Tato jednoduchá závislost, jak vyplývá z obr. 4, se potvrzuje jen do hodnoty Reynoldsova čísla $\text{Re} < 0,5$. Při větších hodnotách Re se závislost stává složitější a Stokesův zákon neplatí.



Obr. 4

Dynamickou viskozitu kapalin lze proto měřit Stokesovou metodou na základě platnosti vztahu (3) pouze v oblasti, kde platí Stokesův zákon. Stanovení viskozity spočívá v měření velikosti rychlosti rovnoměrného pohybu kuličky hustoty ρ v klidné kapalině, která má hustotu ρ_k a jejíž viskozitu určíme.

Z podmínky rovnováhy sil působících na kuličku dostaneme vztah pro měřenou viskozitu, který má tvar

$$\eta = \frac{1}{18} g(\rho - \rho_k) \frac{d^2}{v} . \quad (5)$$

Tento vztah platí přesně pouze v případě pohybu koule v neohrazeném prostředí.

Připomínky k měření a vyhodnocení:

Na válci, ve kterém určujete rychlost kuliček na základě měření času potřebného k proběhnutí určité dráhy, jsou navlečeny posuvné prstence, které tuto dráhu vymezují. Kuličky je třeba vypouštět s nulovou počáteční rychlostí. Měření času kuličky potřebného pro proběhnutí dráhy proveďte nejdříve pro prstence umístěné ve spodní polovině válce, kde se kulička již s největší pravděpodobností pohybuje rovnoměrně.

Takto získaný čas použijte pro výpočet rychlosti kuličky v potřebné pro výpočet součinitele odporu C pomocí vztahu

$$C = \frac{4}{3} g \frac{d(\rho - \rho_k)}{v^2 \rho_k} . \quad (6)$$

Pro vypočtený součinitel odporu C zjistěte z grafu na obr. 3 hodnotu Re . Jestliže vyhovuje podmínce $Re < 0,5$, změřte pro větší vzdálenost prstenců opakovaně čas potřebný k průchodu

kuličky. Z aritmetického průměru časů a vzdálenosti prstenců s stanovte velikost rychlosti v pohybu kuličky.

Standardní nejistotu dynamické viskozity stanovte složením nejistoty typu A a typu B podle obecného vzorce pro šíření nejistot nepřímo měřené veličiny. Nejistotu typu A určete ze směrodatně odchytky opakovaného měření času potřebného k proběhnutí dráhy kuličky. Po úpravě platí jednoduchý vztah

$$u_{r\eta A} = u_{r\tau A} \cdot \quad (7)$$

Relativní nejistotu typu B stanovte aplikací vztahu pro obecný případ součinu a podílu přímo měřených veličin na výraz (5) pro výpočet dynamické viskozity. Vyčíslením (3.25) a po úpravě dostanete

$$u_{r\eta B} = \sqrt{\frac{u_{\rho B}^2 + u_{\rho_k B}^2}{(\rho - \rho_k)^2} + 4u_{rdB}^2 + u_{rsB}^2} \cdot \quad (8)$$

Výslednou standardní nejistotu získáte na základě kvadratického zákona šíření nejistot, a to buď pro absolutní, nebo relativní nejistoty. Platí

$$u_{\eta} = \sqrt{u_{\eta A}^2 + u_{\eta B}^2}, \text{ event. } u_{r\eta} = \sqrt{u_{r\eta A}^2 + u_{r\eta B}^2} \cdot \quad (9)$$