

**VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA
OSTRAVA**



Viskozita tekutin a její měření



Jaroslav Janalík

Ostrava 2010

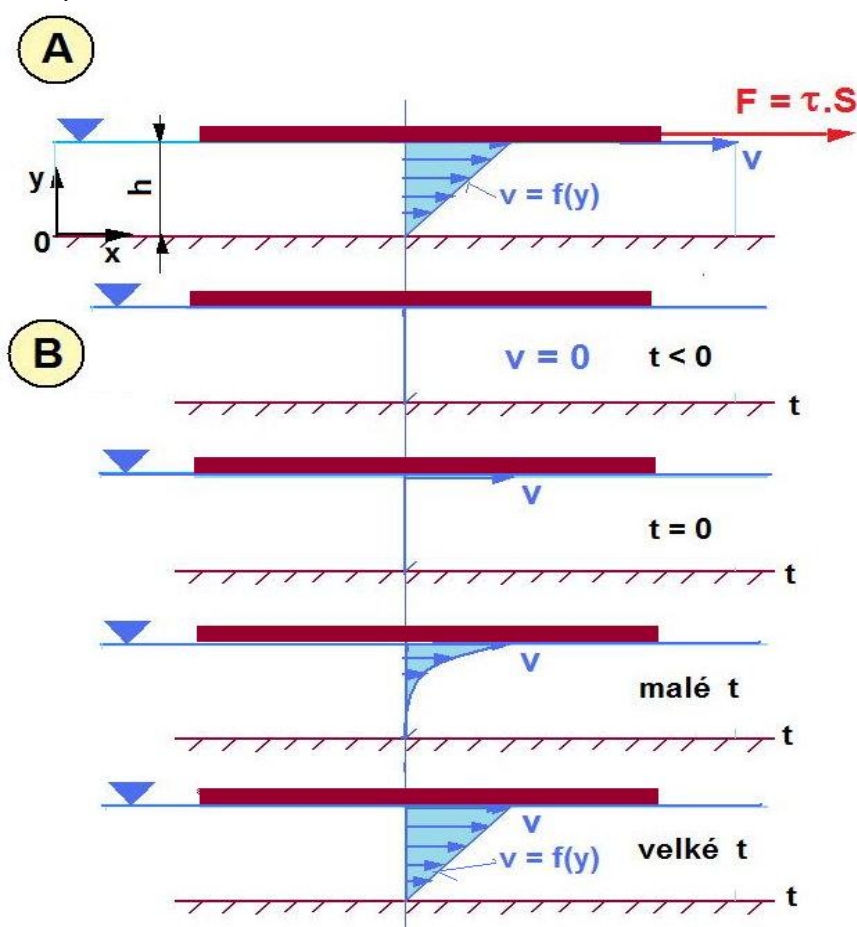
Obsah

1. Vnitřní tření tekutin - viskozita	3
2. Viskozita nelineárních kapalin	8
3. Mocninová rovnice toku	16
4. Rovnice Binghamova	17
5. Měření viskozity	17
6. Kapilární viskozimetr	18
7. Výtokový viskozimetr	24
8. Tělíkové viskozimetry	28
9. Rotační viskozimetr	34
10. Vibrační viskozimetr	42
11. Výtokové kelímky	44
12. Měření relativní viskozity – konzistence rozlivem	45
13. Viskozita olejů	46
14. Příklady odhadu viskozity plynů	53
15. Tabulky	58
Literatura	64
Internetové zdroje	64
Přehled použitých označení	65

1. Vnitřní tření tekutin - viskozita

Pro ideální tekutinu předpokládáme, že v ní neexistují smyková – tečná napětí. Pro skutečnou tekutinu to platí pouze v případě, že tekutina se nepohybuje. V případě, že tekutina proudí a její jednotlivé elementární objemy (molekuly) jsou v relativním pohybu a dvě sousední vrstvy mají rozdílnou rychlost, potom na jejich rozhraní dochází mezi nimi ke tření a ke vzniku smykového napětí, příčinou tohoto jevu je viskozita tekutiny. Při laminárním proudění u kterého jednotlivé proudnice jsou rovnoběžné a tekutina se nepromíchává, pro tečné napětí formuloval Newton zákon, podle něhož je tangenciální napětí v kapalině úměrné dynamické vazkosti a gradientu rychlosti

Pro vysvětlení vzniku viskozity předpokládejme experiment podle obr. 1.1, takový experiment první provedl Newton.



Obr. 1.1 Vznik smykového napětí v tekutině podle Newtona

Mezi dvěma velkými rovnoběžnými deskami se nachází kapalina, dolní deska se nepohybuje, naopak horní deska o ploše S plave na tenké vrstvě kapaliny a může se po hladině pohybovat, tloušťka tekutiny je „ h “ – obr. 1.1A. V čase $t = 0$ se uvede horní deska ve směru x do pohybu rychlostí $v = \text{konst.}$ Předpokládá se dále, že částice tekutiny vzhledem k pevnému povrchu desky se nepohybují, relativní rychlost tekutiny vzhledem k povrchu desky je tedy nulová. S postupem času se hybnost tekutiny zvětšuje a vytváří se rychlostní profil – obr. 1B, za nějaký čas se vyvine plný lineární rychlostní profil. V tomto okamžiku je k pohybu desky zapotřebí síly, jejíž velikost podle Newtona je dána rovnicí

$$F = \tau \cdot S = \eta \frac{v}{h} S,$$

odkud

$$\tau = \eta \frac{v}{h}.$$

Tento výraz je užitečné zapsat v diferenciálním tvar

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} = \eta \cdot j \quad (1.1)$$

kde η - dynamická viskozita, její rozměr je Pa.s

$$j = \frac{dv}{dy} \text{ - gradient rychlosti - rozměr } s^{-1}$$

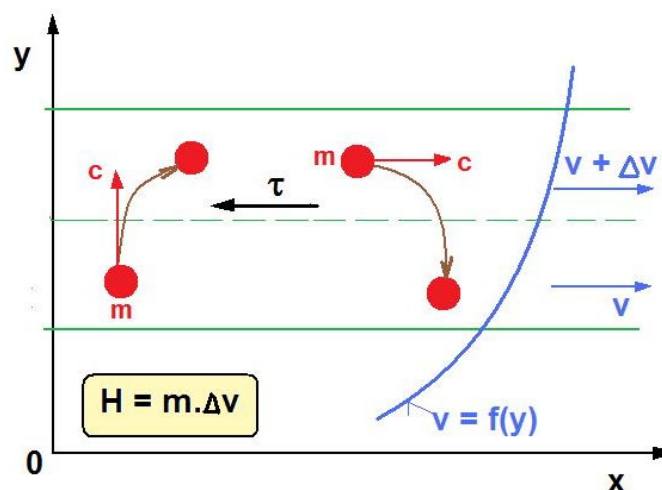
Z předchozí rovnice je patrné, že smykové napětí je úměrné dynamické viskozitě a gradientu rychlosti. Tato rovnice představuje Newtonův zákon viskozity. Tekutiny, které se řídí tímto zákonem (rovnici) se nazývají newtonské, takto se chovají všechny plyny i páry a mnoho běžných kapalin, především voda. Pokud chování kapalin nevyhovuje rovnici (1.1), jedná se o tekutiny nenewtonské, zde patří např. suspenze, vyšší polymery apod.

Z praktického hlediska byla zavedena tzv. kinematická viskozita definovaná výrazem

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (1.2)$$

rozměrem kinematické viskozity ν je m^2/s . Dynamická i kinematická viskozita tekutin se určuje měřením pomocí viskozimetrů, pro většinu známých tekutin lze velikost viskozity v závislosti na tlaku i teplotě zjistit v odborné literatuře.

Při proudění tekutiny podle rovnice (1.1) v nejbližším okolí pohybujícího se povrchu, kde $y = h$, dostává tekutina určitou hybnost ve směru x . Tato tekutina naopak předá část své hybnosti své sousední vrstvě tekutiny, takže i tato vrstva se pohybuje ve směru „ x “. Podle popisovaného pokusu se hybnost ve směru „ x “ předává směrem „ y “ celou tekutinou, smykové napětí τ lze tedy chápat jako viskozitní hustotu toku x -ové složky hybnosti ve směru „ y “. Z obr. 1.1B je vidět, že viskozitní hustota toku hybnosti se pohybuje směrem klesající rychlosti tekutiny (stéká z oblasti velkých rychlostí do oblasti malých rychlostí, toto je analogií s tím, že např. teplo rovněž proudí z teplejšího místa na studenější). Gradient rychlosti je tedy hybnou silou pro sdílení (přenos) hybnosti.

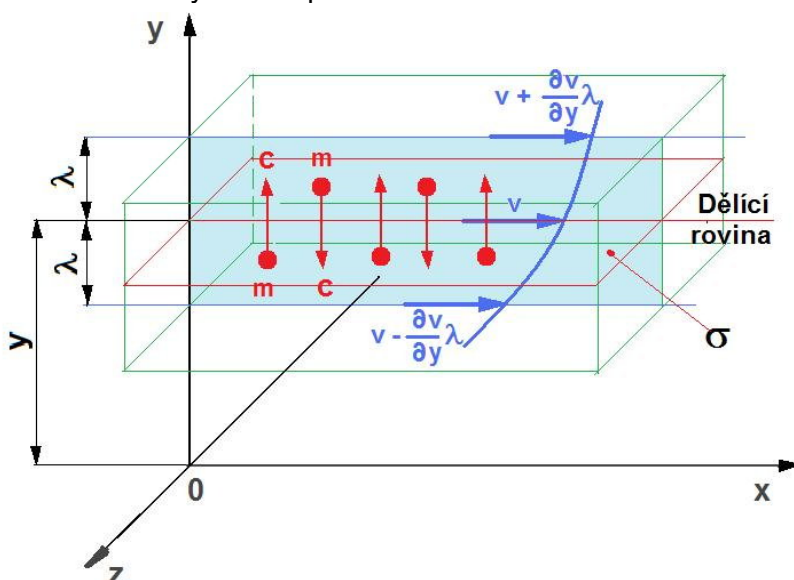


Obr. 1.2 Schéma pro vysvětlení vzniku smykového napětí v proudícím plynu

Vznik viskozity v proudícím plynu je možné vysvětlit z kinetické teorie plynů – [1]. Předpokládejme, že ve 2D prostoru se plyn pohybuje ve směru „ x “ – obr. 1.2, při čemž jeho rychlost $v = f(y)$. Vymeźme v tomto prostoru pás tekutiny, jeho horní polovina se proti spodní

polovině bude pohybovat rychleji, rozdíl rychlostí je Δv . Předpokládejme, že molekula plynu o hmotnosti „m“ se bude pohybovat tepelným pohybem rychlostí „c“. Je pravděpodobné, že směr této rychlosti bude směřovat ze spodní do horní vrstvy. Tím, že se tato molekula ze spodní pomalé vrstvy přesune do horní rychlejší vrstvy plynu, molekula je v horní vrstvě urychlena a molekule je předána hybnost $H = m \cdot \Delta v$.

Stejný mechanismus platí i pro molekuly plynu v horní rychlejší vrstvě. Molekula z této vrstvy se v důsledku tepelného pohybu přesune do spodní pomalejší vrstvy, zde předá část své hybnosti, tato je stejná jako v předcházejícím případě. Z pokusu je zřejmé, že přes myšlenou rovinu se transportuje hybnost (přenos hybnosti), důsledkem čehož je skutečnost, že v myšlené rovině vzniká smykové napětí.



Obr. 1.3. Pronikání molekul plynu z jedné vrstvy do druhé dělicí rovinou „σ“

Podle obr. 1.3 je možné vznik viskozity vysvětlit takto: plyn nechť proudí rovnoběžně s osou x, zvolme v proudícím plynu hranol, jehož výška je $2 \cdot \lambda$, zvolme dělicí rovinu tak, aby byla kolmá na osu y a ležela ve vzdálenosti y od počátku souřadného systému a současně aby půlila zvolený hranol. Podle kinetické teorie se plyn skládá z velkého množství molekul (osamělých hmotných prvků), tyto molekuly se pohybují náhodným tepelným pohybem rychlostí „c“. Při čemž platí, že molekuly tvoří makroskopickou částičku tekutiny (nebo celou vrstvu tekutiny a mají její rychlost. Molekuly při svém náhodném pohybu narážejí na stěny nádoby a srážejí se navzájem mezi sebou, vzdálenost, kterou molekula urazí mezi srážkami je tzv. volná dráha molekul „λ“. Tato dráha je sice malá, ale dostatečná k tomu, aby molekula přešla z jedné vrstvy do druhé. Když se např. molekula z vrstvy rychlejší přesune do vrstvy pomalejší, zvýší se hybnost této pomalejší vrstvy, naopak molekuly z pomalejší vrstvy při přechodu do vrstvy rychlejší způsobí snížení hybnosti této rychlé vrstvy.

Transport molekul z jedné vrstvy do druhé se projevuje tak, že v myšlené dělicí rovině „σ“ existuje smykové napětí „τ“, které zrychluje vrstvu pomalejší a naopak zpomaluje vrstvu rychlejší. Uvažujme v rovině „σ“ jednotkovou plochu, tato nechť je kolmá na osu „y“ – obr. 1.3. Tekutina se pohybuje ve směru osy „x“, ve vzdálenosti „y“ od počátku má rychlost „v“.

Jednotkovou plochou přejdou ze spodní vrstvy do horní vrstvy všechny molekuly plynu, jejichž vzdálenost od uvažované roviny „σ“ je menší než volná dráha molekul „λ“. Je-li ρ hustota plynu a „m“ je hmotnost jedné molekuly, potom počet molekul v jednotkovém

objemu je $n = \frac{\rho}{m}$.

Celkový počet molekul v objemu, jehož základnu tvoří jednotková plocha a výška je střední volná dráha molekul „λ“ je

$$\lambda \cdot 1 \cdot n = \frac{\lambda \cdot \rho}{6 \cdot m}.$$

Z hlediska statistiky je pravděpodobné, že ze všech pohybujících se molekul $1/3$ molekul se bude pohybovat ve směru souřadných os. Podle obr. 1.3 se v kladném směru osy „y“ pohybuje počet molekul

$$\frac{\pi \cdot n}{6} = \frac{\lambda \cdot \rho}{6 \cdot m},$$

a jejich hmotnost je

$$\frac{\lambda \cdot \rho}{6 \cdot m} m = \frac{1}{6} \lambda \cdot \rho.$$

V rovině σ je rychlost molekul „v“, po proběhnutí dráhy „ λ “ se rychlost změní na

$$\left(v + \frac{\partial v}{\partial y} \lambda \right),$$

takže přírůstek hybnosti uvažovaného množství molekul je

$$\left[\left(v + \frac{\partial v}{\partial y} \lambda \right) - v \right] \frac{\lambda \cdot \rho}{6 \cdot m} m = \frac{1}{6} \lambda^2 \cdot \rho \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Z horní vrstvy pak pronikne přes rovinu „ σ “ stejný počet molekul, čemuž odpovídá další změna hybnosti

$$\left[v - \left(v - \frac{\partial v}{\partial y} \lambda \right) \right] \frac{\lambda \cdot \rho}{6 \cdot m} m = \frac{1}{6} \lambda^2 \cdot \rho \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Součet obou těchto hybností je

$$2 \frac{1}{6} \lambda^2 \cdot \rho \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{3} \lambda^2 \cdot \rho \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Za časový interval $\Delta t = \frac{\lambda}{c}$ je časová změna hybnosti

$$\frac{1}{\Delta t} \frac{1}{3} \lambda^2 \cdot \rho \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{1}{3} \lambda \cdot \rho \cdot c \frac{\partial v}{\partial y}.$$

Tato změna připadající na jednotku plochy mezi vrstvami je podle věty o změně hybnosti rovna síle působící ve směru rychlosti „v“ na uvažovanou plochu vrstvy neboli tečné napětí

$$\tau = \frac{1}{3} n \cdot m \cdot c \cdot \lambda = \frac{1}{3} \lambda \cdot \rho \cdot c \frac{\partial v}{\partial y} = \eta \frac{\partial v}{\partial y} = \eta \frac{dv}{dy}, \quad (1.3)$$

kde $\rho = n \cdot m$, odkud

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \cdot \lambda \cdot c. \quad (1.4)$$

Tuto rovnici odvodil Maxwell v r. 1860.

Podle kinetické teorie je rychlost „c“ definována vztahem

$$c = \sqrt{3 \cdot g \cdot r \cdot T} = \sqrt{\frac{8 \cdot \kappa \cdot T}{\pi \cdot m}}, \quad (1.5)$$

kde κ je Boltzmannova konstanta.

Pro dynamickou viskozitu platí tedy rovnice

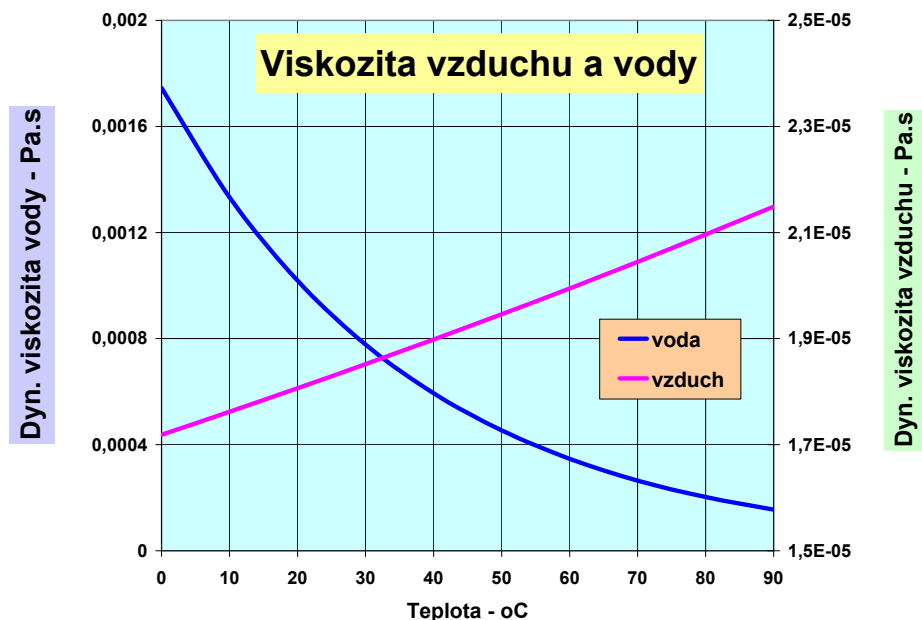
$$\eta = \frac{1}{3} \rho \cdot \lambda \cdot c = \frac{1}{3} \cdot \rho \cdot \lambda \sqrt{3 \cdot g \cdot r \cdot T} = \frac{2}{3 \cdot \pi^{3/2}} \cdot \frac{\sqrt{m \cdot k \cdot T}}{d^2} = konst \cdot \sqrt{T} \quad (1.6)$$

Je-li $\lambda \approx \frac{1}{\rho}$ potom $\lambda \cdot \rho = konst.$, dynamická viskozita η podle předcházející rovnice závisí

pouze na rychlosti tepelného pohybu molekul „c“ a tedy pouze na teplotě T a nezávisí na tlaku plynu. Podle provedených měření viskozity, roste tato v závislosti na teplotě T rychleji, než odpovídá předcházející teoretické rovnici. Nezávislost dynamické viskozity na tlaku odpovídá však skutečnosti pro poměrně velký rozsah tlaků (cca 25 MPa).

Informace o vzniku viskozity v kapalinách jsou převážně empirické, protože kinetická teorie kapalin je ještě nedostatečně propracovaná, přibližná teorie byla vypracována Eyringem. V čisté kapalině v klidu se jednotlivé molekuly neustále pohybují, jejich vzájemná vzdálenost je však malá, proto se molekuly kapaliny pohybují (kmitají) pouze v prostoru, který je omezen sousedními molekulami, tyto vytvářejí pro kmitající molekulu „klec“. Tuto klec představuje energetický val. Podle Eyringa se struktura kapaliny v klidu neustále přeskupuje tak, že jedna molekula v určitém okamžiku unikne ze své klece a vytvoří v mřížce „díru“ a sama se přesune do sousední „díry“ a na její místo přijde jiná sousední molekula. Molekuly se v kapalině pohybují v každém směru kartézských souřadnic ve skocích, jejich délka je totožná se vzdáleností mezi molekulami. Příčinou viskozity u kapalin je překonávání mezimolekulárních sil při proudění s gradientem rychlosti dv/dy . Viskozita u kapalin s rostoucí teplotou klesá a je málo závislá na tlaku.

Jak již bylo uvedeno viskozita tekutin je funkcí stavových veličin a to tlaku a teploty. Vliv tlaku v porovnání s teplotou je méně výrazný. U plynů s rostoucí teplotou roste jeho vnitřní energie a tedy i rychlost molekul, u kapalin s rostoucí teplotou klesají mezimolekulární síly, proto s rostoucí teplotou u plynů viskozita roste, naopak u kapalin viskozita s rostoucí teplotou klesá – obr. 1.4.



Obr. 1.4 Závislost viskozity vody a vzduchu na teplotě

2. Viskozita nenewtonských kapalin

Jak již bylo uvedeno v kap. 1.1, pokud pro kapaliny neplatí rovnice (1.1) pak se jedná o kapaliny nenewtonské. Zatímco poměr tečného napětí newtonských kapalin a smykové rychlosti je dynamická viskozita, která je konstantním látkovým parametrem, charakterizujícím danou kapalinu.

Pro nenewtonskou tekutinu platí analogická rovnice jako pro kapaliny newtonské – rov. (1.1)

$$\tau = \eta_a \frac{dv}{dy} = \eta_a \cdot j, \quad (2.1)$$

kde η_a je zdánlivá viskozita definovaná rovnicí

$$\eta_a = \frac{\tau}{\frac{du}{dr}} = \frac{\tau}{j}. \quad (2.2)$$

Zdánlivá viskozita není pro nenewtonské kapaliny látkovým parametrem, ale je veličinou proměnnou. Její okamžitá hodnota se mění podle použitého napětí a nemůže tudíž v žádném případě sloužit pro fyzikální hodnocení konsistence nenewtonských kapalin.

Vedle zdánlivé viskozity se používá pro hodnocení newtonovské kapaliny při určitém smykovém napětí tzv. diferenciální viskozita daná rovnicí

$$\eta_{\Delta} = \frac{d\tau}{dj}. \quad (2.3)$$

Protože ani zdánlivá ani diferenciální viskozita nejsou pro newtonovskou kapalinu konstantní, je třeba pro fyzikální ohodnocení těchto kapalin udávat jejich závislost na smykovém napětí. Při studiu newtonských kapalin byla velká pozornost věnována určení závislosti tečného napětí na rychlostním gradientu, tzn. reologických modelů. Bylo sestaveno několik rovnic, ve většině případů empirických, které uvedenou závislost popisují, některé vybrané rovnice uvádí tabulka 2.1.

Tabulka 2.1 Vybrané typy rovnic popisujících newtonské chování tekutin

Číslo	Název funkce	rovnice
1	Lineární funkce	$\tau = \eta \cdot j$
2	Ostwald	$\tau = A \cdot j^B$
3	Steiger Ory	$j = A \cdot \tau + B \cdot \tau^3$
4	Parabolická	$\tau = A + B\tau + C \cdot \tau^2$
5	Logaritmická	$\tau = A + B \cdot \ln j$
6	Hyperbolická	$\tau = A + \frac{B}{j}$
7	Cassoin	$\sqrt{\tau} - \sqrt{A} = \sqrt{B} \cdot \sqrt{j}$

Pro popis reogramů bez inflexních bodů se obvykle vystačí s jednoduššími rovnicemi, tzn. reologický model obsahuje pouze dva parametry, jsou to dvouparametrové rovnice. Renogramy s inflexním bodem se obvykle řeší pomocí rovnic tříparametrových. V tabulce 2.2 je pro názornost uvedeno několik nejčastěji používaných reologických modelů - [1].

V další části této kapitoly bude uvedeno podrobněji řešení s použitím mocninové a Binghamovy rovnice toku.

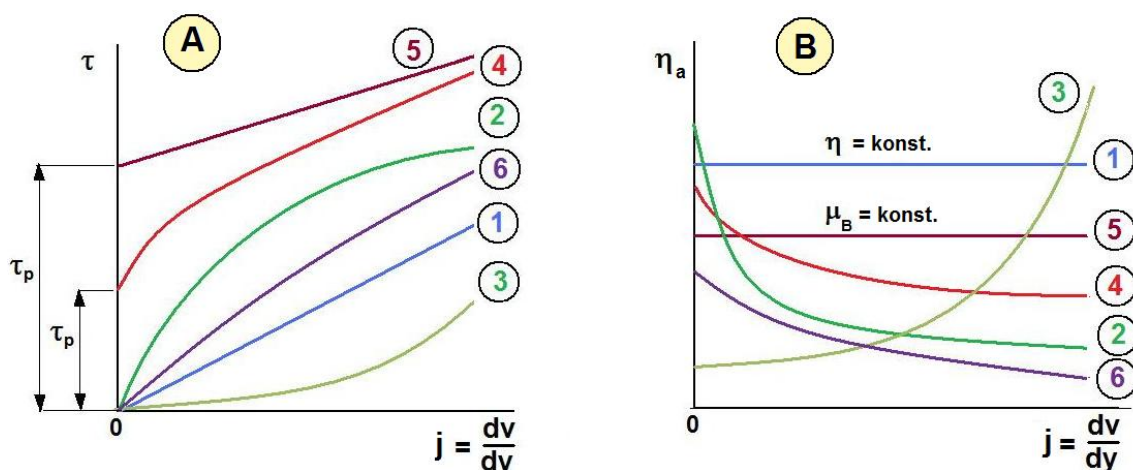
Eyringův model je dvouparametrický a byl odvozen z Eyringovy kinetické teorie kapalin, jedná se tedy o model poloempirický, ostatní modely jsou pouze empirické.

Ellisův model obsahuje tři kladné parametry. Pro $\alpha \geq 1$ blíží se model Newtonovu zákonu při malém smykovém napětí τ . Pro $\alpha \leq 1$ platí Newtonův zákon při velkých smykových napětích τ . Tento model je velmi pružný a pro $\varphi_1 = 0$ přejde v Newtonovu rovnici, pro $\varphi_0 = 0$ přejde v mocninovou rovnici toku. Ellisovy parametry pro některé látky uvádí literatura.

Reinerův-Phillippoffův model obsahuje tři parametry. Tato rovnice je sestavena tak, že Newtonův zákon pro nízké rychlosti smyku je splněn při $\mu = \mu_0$ a naopak pro vysoké rychlosti smyku při $\mu = \mu_\infty$. Literatura uvádí parametry některých látek tohoto modelu.

Tabulka 2.2 Přehled nejpoužívanějších časově nezávislých reologických modelů – [4]

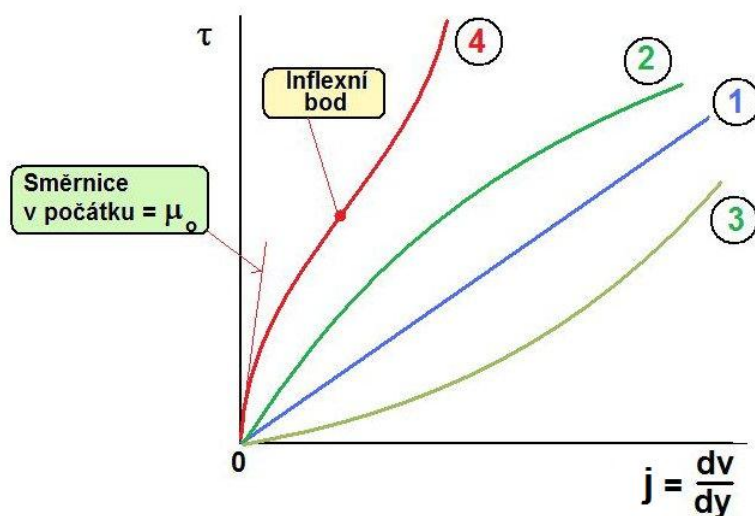
Číslo	Autor	Vzorec	Poznámka
1	Newton	$\tau = \eta \frac{du}{dr} = \eta j$	η - dynamická viskozita
2	Ostwald - de Waele	$\tau = K \left(\frac{du}{dr} \right)^n = K j^n$	K - koeficient konzistence n - index toku
3	Bingham	$\tau = \tau_p + \mu_B j$	τ_p - počáteční tečné napětí μ_B - Binghamova viskozita
4	Eyring	$\tau = \frac{1}{a} \operatorname{arcsinh}(bj)$	$\frac{1}{a}$ - vnitřní tečné napětí $\frac{1}{b}$ - vnitřní smykové napětí
5	Bulkley - Herschel	$\tau = \tau_p + K j^n$	τ_p - počáteční tečné napětí K - koeficient konzistence n - index toku
6	Vočadlo	$\tau = \tau_p^n + K j^n$	τ_p - počáteční tečné napětí K - koeficient konzistence n - index toku
7	Ellis	$j = (\varphi_0 + \varphi_1) \tau ^{\alpha-1} \cdot \tau$	$\varphi_0; \varphi_1; \alpha$ - tři parametry Ellisova modelu
8	Reiner-Phillippoff	$j = \frac{\tau}{\mu_\infty + \frac{\mu_0 - \mu_\infty}{1 + \left(\frac{\tau}{\tau_s} \right)^n}}$	$\mu_0; \mu_\infty; \tau_s$ - tři parametry Inflexní bod je při: $\tau = \pm \tau_s \sqrt{\frac{3 \cdot \mu_0}{\mu_s}}$



Obr. 2.1 Reogramy a zdánlivá viskozita vybraných nenewtonských kapalin A - reogram; B – zdánlivá viskozita – [4]

1. newtonská kapalina; 2. pseudoplastická kapalina; 3. dilatantní kapalina; 4. skutečná plastická kapalina; 5. Binghamova – ideálně plastická kapalina; 6. Eyringův model

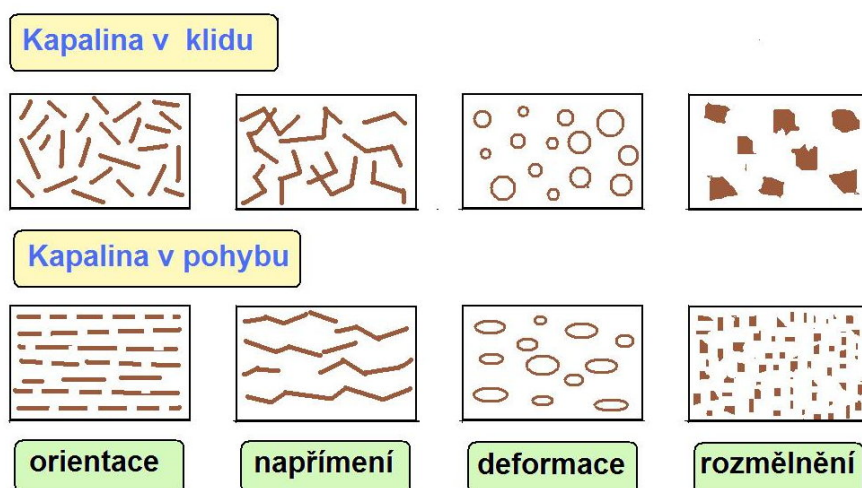
Grafická znázornění rovnic podle Tab. 2.1 se nazývají tokové křivky nebo reogramy. Nejobvyklejšími souřadnicemi pro kreslení těchto reogramů jsou τ vůči j nebo logaritmy těchto proměnných. Reogramy pro dvouparametrické modely nejčastěji se vyskytujícími nenewtonovských kapalin a závislost viskozity jsou uvedeny na obr. 2.1, na obr. 2.2 jsou uvedeny vybrané tříparametrické modely



Obr. 2.2 Reogramy tříparametrových modelů – [1]

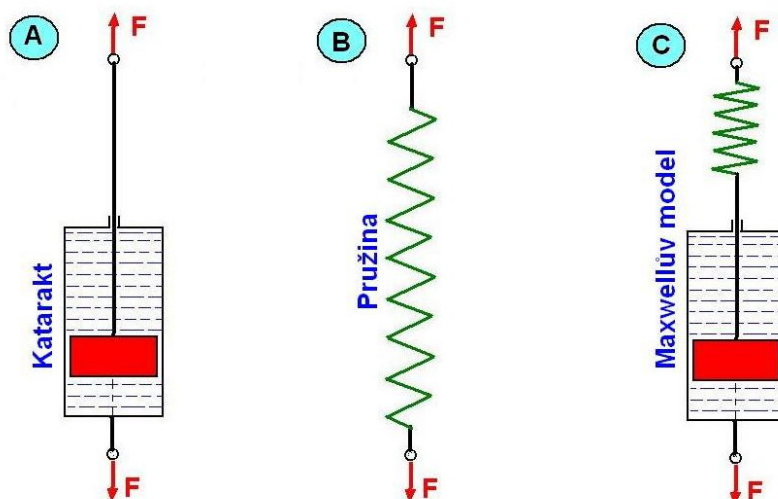
1 - Newtonův; 2 - Ellisův $\alpha \geq 1$; 3 - Ellisův $\alpha \leq 1$; 4 - Reinerův-Phillippoffův

Když při proudění kapalin dochází v důsledku toku ke změně vnitřní struktury např. podle obr. 2.3, potom takové látky mají nenewtonské chování.



Obr. 2.3 Vliv toku na uspořádání částic v nelineární kapalině – [2]

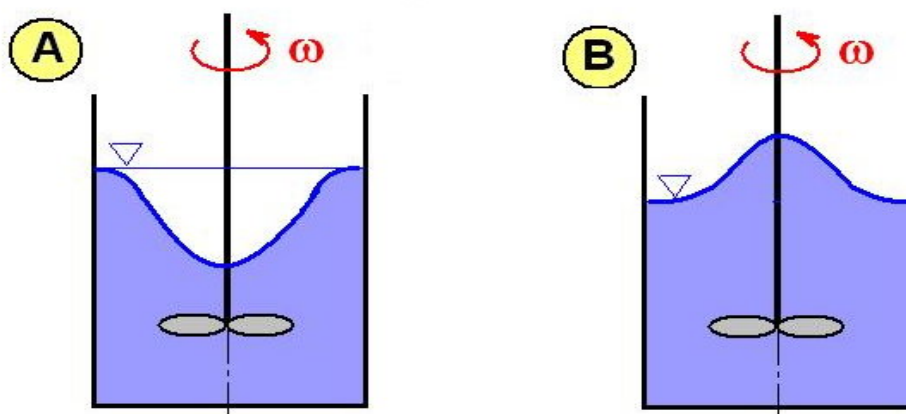
Čistě viskozní kapaliny jsou látky, které při nulové rychlosti deformace vykazují vždy nulové tečné napětí. Látky čistě elastické vykazují při nulovém napětí vždy nulovou deformaci a po skončení napětí se tyto látky vrací do původního nezatíženého stavu. U čistě elastických látek závisí napětí v každém okamžiku pouze na velikosti deformace, naopak u látek čistě viskozních závisí napětí na rychlosti deformace. U viskoelastických kapalin nezávisí napětí ani pouze na velikosti deformace, ani pouze na rychlosti deformace, ale závisí na celém předchozím průběhu deformace. U těchto látek po skončení toku nenabude napětí okamžitě nulové hodnoty, ale bude k nulové hodnotě klesat postupně. Příklady mechanických modelů těchto látek uvádí obr. 2.4, studiem vztahů mezi smykovým napětím, deformací nebo rychlostí deformace se zabývá vědní obor reologie.



Obr. 2.4 Mechanické modely reologického chování látek

a) čistě viskozní kapalina, b) elastická látka, c) viskoelastická látka-Maxwellův model

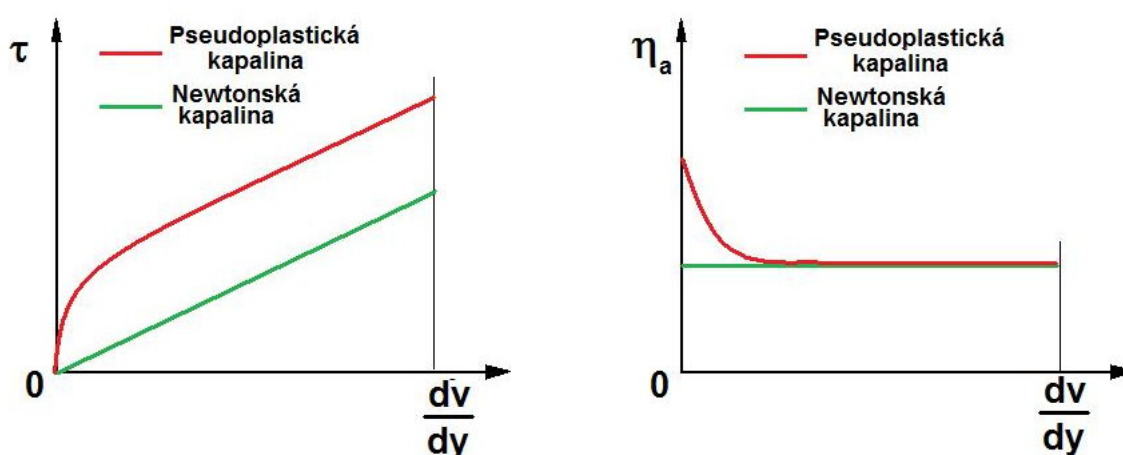
Chování kapalin při míchání rotujícím míchadlem uvádí obr. 2.5, nelineární kapaliny vykazují anomální chování, když kapalina stoupá nahoru po hřídeli míchadla.



Obr. 2.5 Chování kapalin při míchání rotujícím tělesem
a) viskozní kapaliny, b) viskoelastické kapaliny

Tok je nevratná deformace probíhající v čase. Mez toku pozorovatelná u binghamských látek je určena počátečním napětím τ_p , při jehož překročení začíná soustava, která se do té doby chovala jako pružné těleso téci, tj. dochází k jejímu toku. Elasticita je vlastnost materiálu, projevující se jeho snahou obnovit po deformaci při poklesu napětí původní tvar nebo velikost, případně obojí. Relaxace napětí je postupné zmenšování napětí při konstantní deformaci. Deformace je změna vzájemných vzdáleností různých bodů v dané látce proti původnímu stavu, způsobena změnou tvaru nebo objemu, případně obou.

Pseudoplastické kapaliny – (řídnoucí tekutiny) jsou charakterizovány poklesem zdánlivé viskozity při rostoucím smykovém napětí – obr. 2.6. Na obrázku je provedeno srovnání pseudoplastické kapaliny v newtonskou, při čemž dynamická viskozita je volena tak, že newtonská kapalina má stejnou viskozitu jako kapalina pseudoplastická pro vysoký gradient rychlosti. Mezi pseudoplastické tekutiny patří např. suspenze nesouměrných částic, některé koloidní roztoky, kaly, pasty, taveniny a roztoky polymerů, celulóзовé deriváty, kaučuky, latexy, barvy, mazadla, suspenze papíru apod. Pseudoplastické kapaliny tečou při sebemenším napětí, proto toková křivka prochází počátkem jako u kapalin newtonských. Pseudoplasticita je z technického hlediska vítanou vlastností, protože snižuje energetickou náročnost při proudění kapalin v potrubí nebo při míchání kapalin.



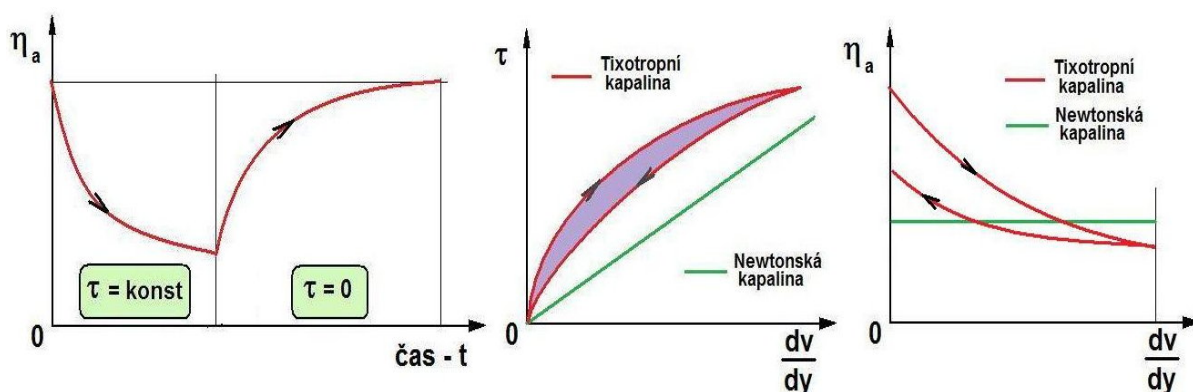
Obr. 2.6 Toková křivka a průběh zdánlivé viskozity – porovnání newtonské kapaliny s pseudoplastickou – [4]

S rostoucím rychlostním gradientem se nesouměrné částice nebo molekuly postupně vyrovnávají. V klidovém stavu jsou částice náhodně promíchány, zatím co při pohybu se postupně orientují hlavními osami do směru pohybu. Zdánlivě vazkost stále klesá s

rostoucím rychlostním gradientem až k určité hodnotě, při níž již není možné dokonalejší uspořádání částic. Od této hodnoty je již vztah pro τ lineární.

Hypotéza pseudoplastického chování předpokládá, že změna struktury, tj. orientace částice nastane okamžitě jakmile začne působit smykové napětí, nebo v době tak krátké, že použitím běžných viskometrických metod není možné časový úsek zjistit. Jestliže změna struktury nenastane okamžitě a k jejímu vytvoření je potřeba určité doby, takové kapaliny se nazývají tixotropní.

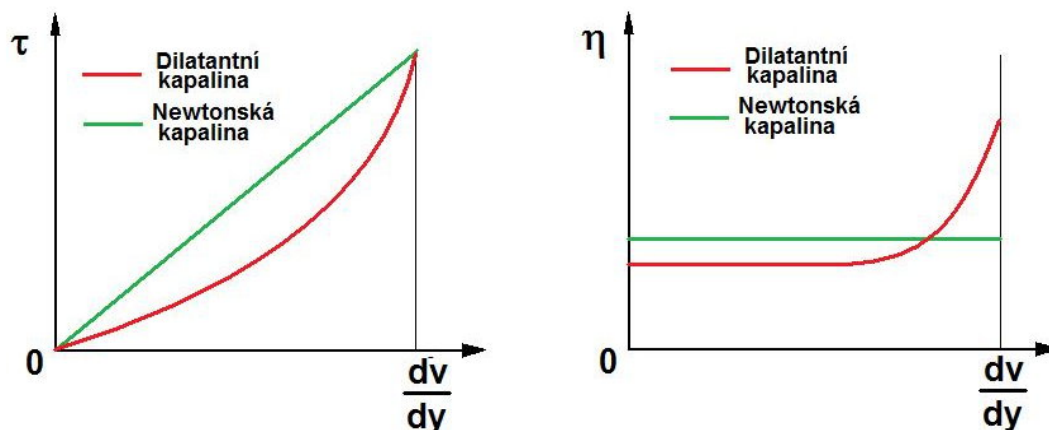
Tixotropní kapaliny – tzv. kapaliny řídnuocí – obr. 2.7. Jsou – li pseudoplastické nebo plastické kapaliny vystaveny smykovému namáhání např. při míchání, třepání apod., je jejich zdánlivá viskozita zpočátku vysoká, tato s rostoucím časem klesá, takové kapaliny jsou tixotropní. Jsou-li však kapaliny ponechány v klidu, potom se původní struktura obnoví a zdánlivá viskozita se blíží původní vysoké hodnotě – obr. 2.7.



Obr. 2.7 Závislost smykového napětí na čase a gradientu rychlosti pro tixotropní kapalinu – [4]

Na tokové křivce u tixotropních kapalin se objevuje hysterezní smyčka, tzn., že průběh tokové křivky při zvyšování napětí se neshoduje s průběhem při snižování napětí. Hysterezní smyčka probíhá ve směru hodinových ručiček. Tixotropie se uplatňuje v průmyslu barev, kdy je žádoucí, aby barva byla tekutá pouze při jejím natírání.

Dilatantní kapaliny - reciprokým jevem k pseudoplasticitě je dilatace charakterizovaná růstem zdánlivé viskozity se vzrůstajícím tečným napětím (houstnoucí tekutiny) – obr. 2.8. Jsou to např. rozpouštědla barev, některé nátěrové a tiskařské barvy, vodní suspenze železité červeně, kyslíčnicku zinečnatého, některých pigmentů, kobaltové modři, škrobové mazy, beton, arabská guma a některé polymerové roztoky, med aj.



Obr. 2.8 Toková křivka a průběh zdánlivé viskozity – porovnání dilatantní kapaliny s newtonskou – [4]

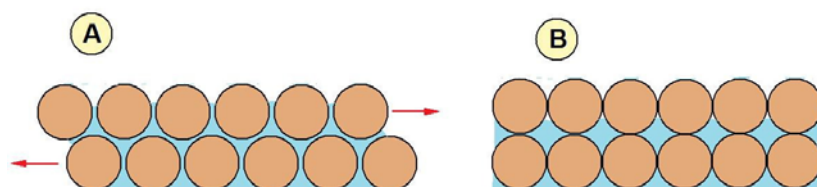
Tyto kapaliny při malých napětích připomínají kapaliny newtonské, gradient rychlosti roste úměrně s napětím, zdánlivá viskozita je konstantní, pro toto chování platí

$$\tau = \eta_a \frac{dv}{dy} = \eta_a \cdot j.$$

Při větších silách však nastává náhlý vzrůst zdánlivé viskozity a gradient rychlosti zůstává při dalším zvyšování napětí prakticky konstantní, proto platí

$$\frac{dv}{dy} = konst.$$

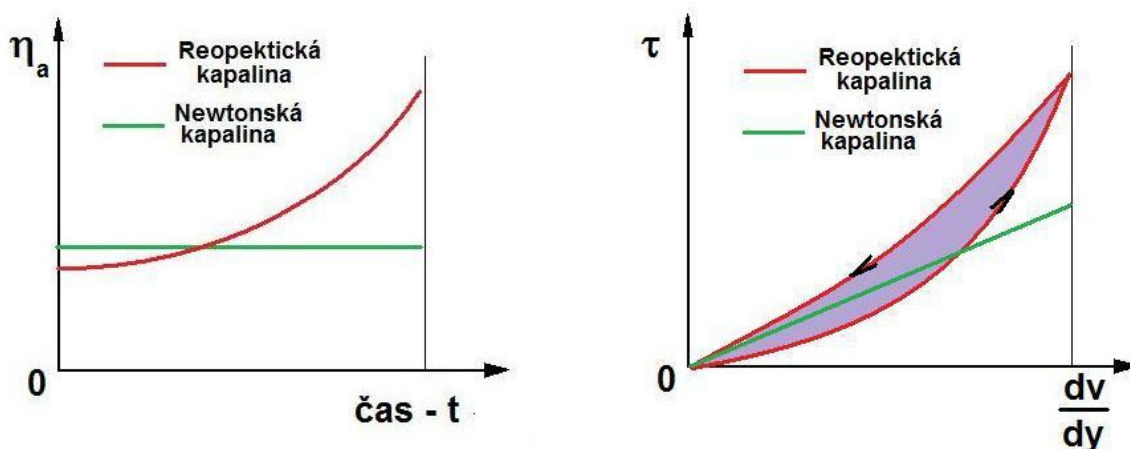
Vysvětlení dilatace podle Reynoldse je následující – obr. 2.9 :



Obr. 2.9 Uspořádání kulových částic v suspenzi pro vysvětlení dilatace – [4]

Za klidu je objem dutin mezi částicemi minimální a tekutina právě dostačuje k vyplnění těchto mezer. Jakmile se začne taková suspenze pohybovat s malým rychlostním gradientem, kapalina působí jako mazivo mezi částicemi a napětí jsou malá. Při vyšších rychlostních gradientech se těsné uložení částic změní ve vrstevnaté, suspenze se mírně roztáhne - dilatuje - a mezerovitost (objem dutin) vzroste. V tomto případě nastane nedostatek „mazací kapaliny“ a tangenciální napětí musí být tedy větší. Dilatace suspenze způsobuje rychlý vzrůst zdánlivé viskozity s rostoucím rychlostním gradientem. V technické praxi je výskyt dilatantních tekutin velmi malý. Bude-li nastávat tento jev s časovým zpožděním, bude se nazývat reopexie.

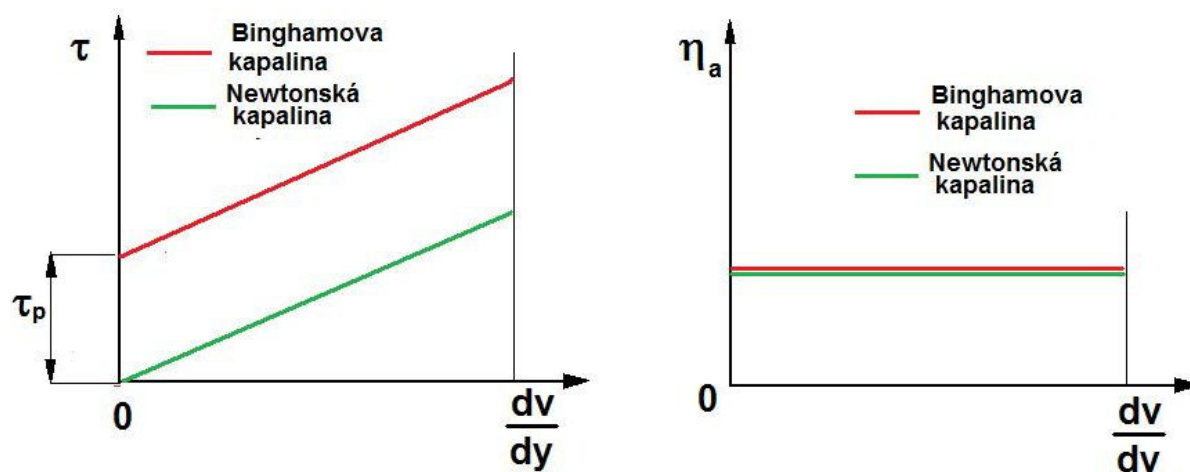
Reopektické kapaliny - jsou-li dilatantní kapaliny vystaveny smykovému namáhání např. při míchání, třepání apod. je jejich zdánlivá viskozita zpočátku nízká, tato s rostoucím časem stoupá, takové kapaliny jsou reopektické. Jsou-li však kapaliny ponechány v klidu, potom se původní struktura obnoví a zdánlivá viskozita se blíží původní vysoké hodnotě – obr. 2.10



Obr. 2 10 Závislost smykového napětí na čase a gradientu rychlosti pro reopektickou kapalinu – [4]

Na tokové křivce u reopektických kapalin se objevuje hysterezní smyčka, tzn., že průběh tokové křivky při zvyšování napětí se neshoduje s průběhem při snižování napětí. Hysterezní smyčka na rozdíl od tixotropních kapalin probíhá proti směru hodinových ručiček.

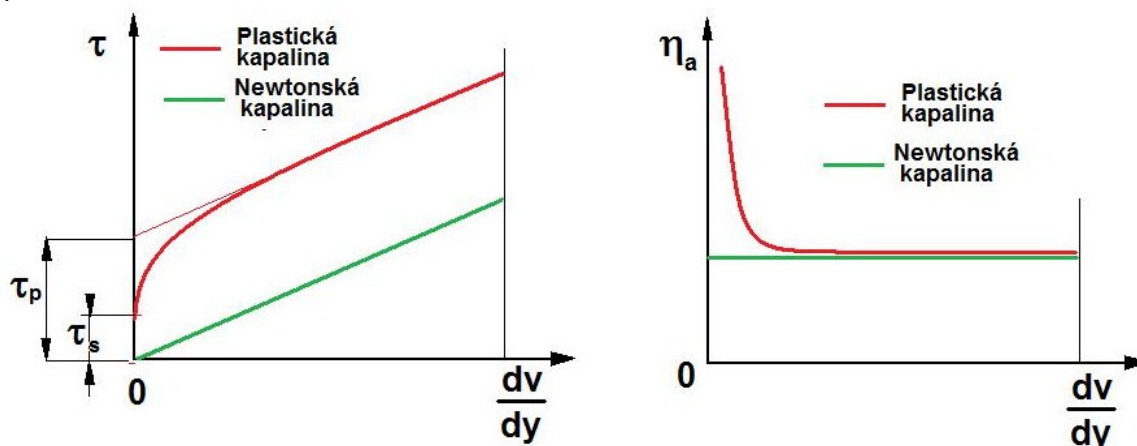
Binghamova tekutina – ideálně plastická - je charakterizována tím, že v klidu má tekutina trojrozměrnou strukturu, která má tuhost, schopnou vzdorovat libovolnému napětí menšímu než napětí na mezi deformace τ_p , tzv. počáteční smykové napětí, nebo též dynamická mez toku – obr. 2 11.



Obr. 2 11 Závislost smykového napětí a zdánlivé viskozity na gradientu rychlosti pro Binghamovu kapalinu – [4]

Po dosažení tohoto napětí se struktura rozpadne a látka se chová, tj. teče jako newtonovská tekutina. Po opětovném poklesu napětí pod tuto kritickou hodnotu se vnitřní struktura hmoty opět obnoví. Do této kategorie patří hlavně koncentrované kašovitě a zrnité suspenze, průmyslové, odpadní, vrtné a stokové kaly, bahno, řídké kaše, pasty, plastické gely, olejové barvy, některá mazadla apod. Ideální Binghamovy tekutiny charakterizuje přímkový vztah mezi tečným napětím a rychlostním gradientem. Přímka vychází z bodu na ose tečného napětí určeného napětím na mezi trvalé deformace τ_p . Velmi často při nízkých rychlostních gradientech neplatí přímková závislost, protože skutečná hodnota τ_p je menší než u ideální Binghamovy tekutiny.

Skutečná plastická tekutina – stejně jako Binghamova kapalina je charakterizována tím, že v klidu má tekutina trojrozměrnou strukturu, která má tuhost, schopnou vzdorovat libovolnému napětí menšímu než napětí na mezi deformace τ_s , tzv. počáteční smykové napětí, nebo též statická mez toku – obr. 2 12.



Obr. 2 12 Závislost smykového napětí a zdánlivé viskozity na gradientu rychlosti pro skutečnou plastickou kapalinu - [4]

Po dosažení tohoto napětí se struktura rozpadne a látka se chová, tj. teče jako newtonovská tekutina. Po opětovném poklesu napětí pod tuto kritickou hodnotu se vnitřní struktura hmoty opět obnoví. Pro malé gradienty rychlosti je zdánlivá viskozita vysoká, s rostoucím gradientem zdánlivá viskozita klesá a při dalším zvýšení se stává konstantní – obr. 2.12.

3. Mocninová rovnice toku

Nejstarším analytickým vyjádřením závislosti smykové rychlosti na tečném napětí nenewtonovských kapalin jsou mocninové funkce – [4]. Nejčastěji se používá formulace Ostwalda a de Waelea

$$\tau = K \left(\frac{du}{dr} \right)^n = K \cdot j^n, \quad (3.1)$$

kde K - součinitel konsistence

n - index toku, jehož hodnota pro pseudoplastické tekutiny je menší než 1, zatímco pro newtonovské tekutiny je rovna jedné a pro dilatantní tekutiny je větší než jedna.

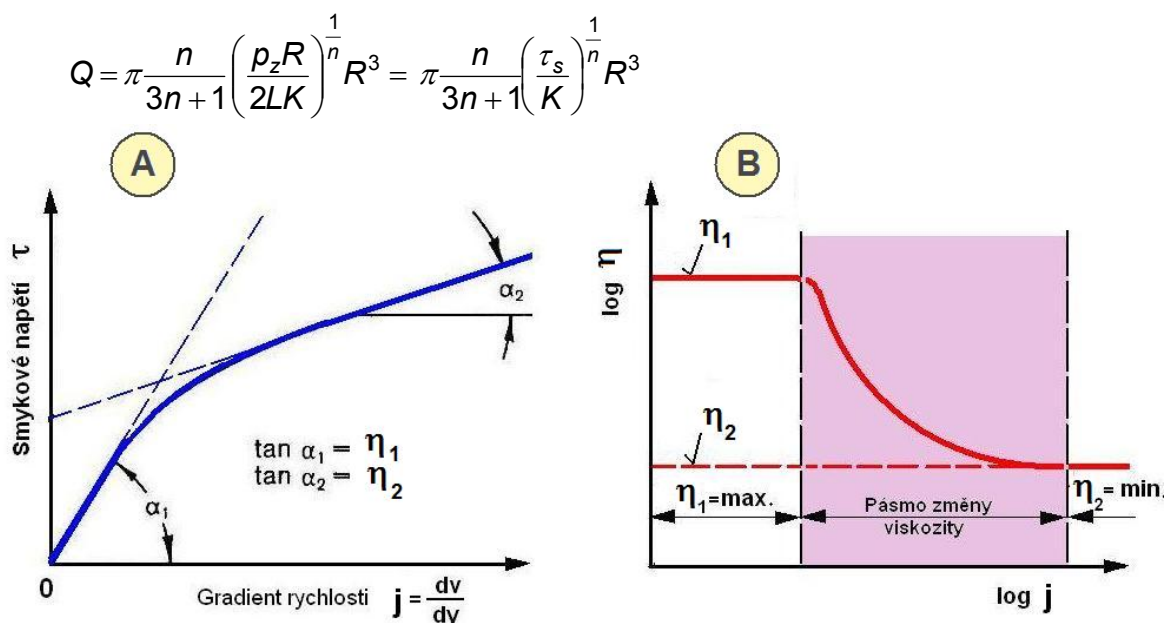
Podle definice (2.2) pro zdánlivou viskozitu platí

$$\eta_a = \frac{\tau}{j} = K \cdot j^{n-1}, \quad (3.2)$$

a podle rovnice (2.3) pro diferenciální viskozitu

$$\eta_\Delta = \frac{d\tau}{dj} = n \cdot K \cdot j^{n-1}. \quad (3.3)$$

Nejsou tedy μ_a ani μ_Δ látkovými parametry, protože jejich hodnota závisí na rychlostním gradientu j . Na obr. 3.1A je reogram pseudoplastické kapaliny, která má pro nulový gradient rychlosti max. diferenciální viskozitu, od jisté velikosti gradientu rychlosti je viskozita konstantní a současně je i minimální – obr. 3.1B. Pro velikost průtoku je možné odvodit rovnici, tato bude aplikována při měření viskozity kapilárním viskozimetrem



Obr. 3.1 Závislost $\tau = f(j)$ a $\mu = f(j)$ pro pseudoplastickou látku

Mocninové funkce jsou pouze interpolačními rovnicemi a nebyly odvozeny na základě fyzikálního modelu vnitřní struktury kapalin. Z tohoto důvodu bylo jejich používání podrobeno kritice, avšak mocninové funkce přes tento nedostatek vystihují při poměrné jednoduchosti

většinu skutečných tokových křivek velmi dobře a selhávají jen pro kapaliny, jejichž reogramy mají inflexní body. V těchto případech je však možno použít mocninových funkcí s dostatečnou přesností pro část tokové křivky.

4. Rovnice Binghamova

Velikost smykového napětí pro binghamské tekutiny - [4] je dáno rovnicí

$$\tau = \tau_p + \mu_B \frac{du}{dr} = \tau_p + \mu_B j, \quad (4.1)$$

kde τ_p - je počáteční smykové napětí

μ_B - je plastická (nebo též Binghamova) viskozita

Z rovnice (2.2) pro zdánlivou viskozitu dostaneme

$$\eta_a = \frac{\tau}{j} = \frac{\tau_p}{j} + \mu_B, \quad (4.2)$$

a pro diferenciální viskozitu z rovnice (2.3)

$$\eta_\Delta = \frac{d\tau}{dj} = \mu_B. \quad (4.3)$$

5. Měření viskozity

Pro měření viskozity tekutin se používají následující způsoby:

- kapilární viskozimetry (zde je možné zařadit i viskozimetry výtokové), využívající platnost Hagen – Poiseuilleova zákona při laminárním proudění v kruhovém potrubí – kapiláře.
- kuličkový viskozimetr využívající platnosti Stokesova zákona při laminárním obtékání kuličky.
- rotační viskozimetr v provedení dvou sousedních válců, z nichž jeden stojí a druhý se otáčí - tzv. Couettovo proudění, používá se také provedení kužel – deska, obvykle se kužel otáčí a deska stojí.
- vibrační viskozimetry využívající tlumících schopnosti tekutiny jako důsledek její viskozity.

Tekutiny jak již bylo uvedeno jsou newtonské a nenewtonské. Viskozita newtonských kapalin je látkový parametr závislý na tlaku a teplotě, proto měření viskozity je snadnější a pro stanovení viskozity se dají použít všechny výše jmenované způsoby. Mezi newtonské tekutiny patří rovněž plyny, pro měření jejich viskozity jsou vhodné hlavně viskozimetry kapilární případně kuličkové. U nenewtonských kapalin není viskozita látkový parametr, musí se proto měřit celá toková křivka – reogram. Pro viskozimetry byly vydány normy např. ISO 3219, ISO 2555, DIN 53018, DIN 53019, DIN 51560, DIN 54453, ČSN EN ISO 2431, ČSN 67 3016, ČSN 67 3013, ČSN 67 3054.

Zjišťování tokových křivek nenewtonovských kapalin je úloha obtížná, hlavně u suspenzí. Viskozita se prakticky nedá měřit u suspenzí nestabilních, tj. u takových, kde dochází během krátké doby k rozvrstvení.

Pro měření viskozity a tokových křivek se používají viskozimetry, z mnoha známých a vyráběných přístrojů se pro nenewtonovské kapaliny hodí pouze takové přístroje, u kterých je geometrie toku jednoznačně definována a u nichž můžeme určit hodnotu gradientu rychlosti $j = du/dr$ a jemu odpovídající hodnotu tečného napětí. Nebudou vhodné takové přístroje, kde není měřeno laminární proudění, kde není definována geometrie toku a kde není možno přímo odečítat hodnoty tečného napětí a jemu odpovídající rychlost smykové deformace.

Těmto podmínkám vyhovují viskozimetry kapilární, kde se proudění kapaliny řídí Poiseuillovým zákonem a viskozimetry rotační, pro které platí Couettovo proudění v mezikruží dvou sousedních, navzájem se otáčejících válců a viskozimetry kuželové, pro které platí rovněž Couettovo proudění jako zvláštní případ proudění ve štěrbině mezi deskou a rotujícím kuželem. Za omezených podmínek se dají použít i viskozimetry kuličkové.

Do skupiny nevhodných přístrojů patří takové, kde se viskozita měří podle délky doby vytékání kapaliny otvorem nebo krátkou kapilárou, např. viskozimetr Englerův. Mezi nevhodné přístroje je třeba zařadit i ty, které jsou založeny na Stokesově zákonu, tj. přístroje s padajícím tělískem (kulička, váleček). Sem patří velmi rozšířený Höpplerův, který používá padající kouli. Rychlost smykové deformace i velikost tečného napětí není na obtékané kouli konstantní, kromě toho se uplatňuje ještě i vliv stěny na obtékání koule.

Viskozimetry kapilární a rotační, které jsou jedině vhodné pro zjišťování tokových křivek newtonovských kapalin, vykazují v případě měření suspenzí jisté potíže. Především se nedají použít pro nestabilní suspenze.

Další problém je nehomogenita měřeného vzorku, jejíž příčina je sedimentace pevných částic, která se škodlivě uplatňuje u obou typů viskozimetrů. Tento vliv se obvykle odstraňuje mícháním suspenze v zásobníku kapilárního viskozimetru a nahrazením rotačního válce vhodným míchadlem u viskozimetrů rotačních. Další komplikací, která se projevuje pouze u rotačních viskozimetrů, je odstřeďování částic suspenze. Měření, při nichž dochází k tomuto jevu se, ovšem musí považovat za neplatná. U suspenzí dochází v některých případech k odpuzování mezi stěnou přístroje a částicemi, což může mít příčinu v silách elektrických nebo povrchových. V takových případech vznikne těsně u stěny film čisté kapaliny, bez dispergovaných částic, takže těsně u stěny se částice nezúčastní přenosu tečného napětí, což přirozeně značně zkresluje výsledky. Tuto nesnáz, která se nazývá skluzem u stěny, lze někdy odstranit změnou materiálu měřicího elementu. Někdy postačí úprava povrchu, tj. odmaštění, vychlazení nebo naopak zdrsňení stěn, které se suspenzí přichází do styku a také změna průměru kapiláry.

6. Kapilární viskozimetr.

Měření viskozity kapilárním viskozimetrem vychází z Hagen – Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici kruhového průřezu – [4]. Podle tohoto zákona pro objemový průtok platí rovnice

$$Q_V = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot v_s = \frac{\pi}{128} \frac{\rho_z d^4}{\eta L} = \frac{\pi}{8} \frac{\rho_z R^4}{\eta L}, \quad (6.1)$$

z této rovnice je dynamická viskozita určena vztahem

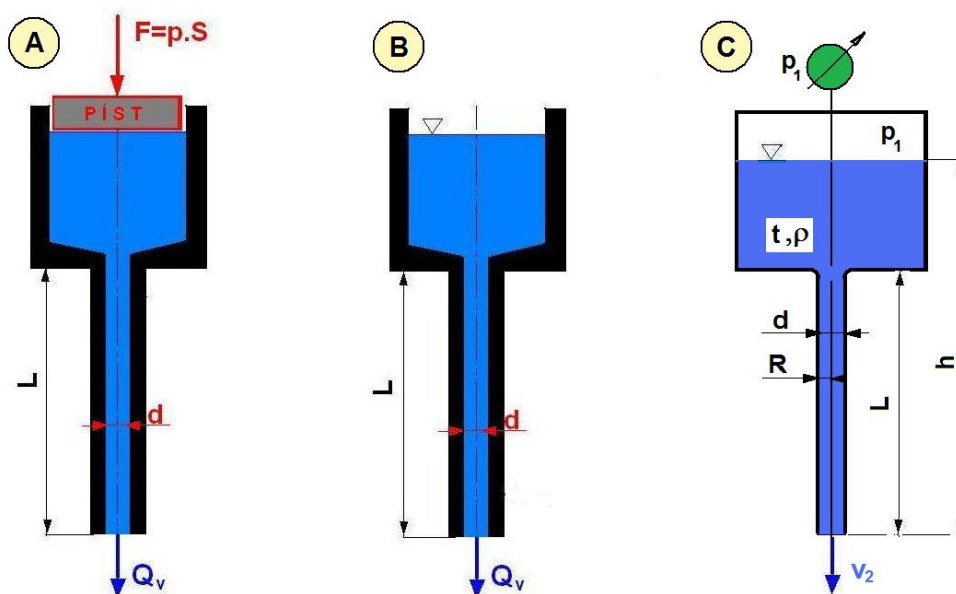
$$\eta = \frac{\pi}{128} \frac{\rho_z d^4}{Q \cdot L} = \frac{\pi}{8} \frac{\rho_z R^4}{Q \cdot L} = \frac{\pi}{8} \frac{\rho_z R^4 \cdot \tau}{V \cdot L}. \quad (6.2)$$

Při laminárním toku měrnou kapilárou, jejíž geometrická rozměry tj. vnitřní průměr – d, nebo poloměr – R a délka – L jsou známy, je dynamická viskozita úměrná objemovému průtoku Q a tlakovému spádu mezi začátkem a koncem kapiláry, a je ji možné snadno z rovnice (6.2) vypočítat.

U kapilárních viskozimetrů se nejčastěji používá provedení s konstantním tlakovým spádem a měří se objemový průtok kapaliny. Tlakový spád se v tomto případě vytváří sloupcem měřené kapaliny, jehož výška se mění v několika polohách, nebo tlakem inertního plynu na hladinu a to buď prostřednictvím pístu nebo i bez něj (tzv. výtlačné viskozimetry). Méně časté je provedení viskozimetrů s konstantním objemovým průtokem měřené kapaliny. Tyto přístroje jsou složitější, neboť vyžadují spolehlivé objemové dávkování se stabilizací objemového průtoku, případně výkonu nebo otáček čerpacího zařízení.

Výtok měřené kapaliny z kapiláry může být provedeno tak, že kapaliny vytéká do prostředí vyplněné kapalinou, tzv. provedení Ostwaldovo, nebo ve druhém případě kapalina vytéká do volného prostoru, který je zvláštním otvorem spojen s atmosférou, toto je tzv. provedení Ubbelohdovo. Nejdůležitějším a současně i nejchoulostivějším místem kapilárních viskozimetrů je právě měrná kapilára a její vestavění do přístroje. U některých provedení kapilárních viskozimetrů bývá možnost výměny několika měrných kapilár různého průměru i

délky. U kapiláry je nutné znát vedle délky i její průměr a pro přesná měření je vhodné se přesvědčit o ovalitě a kuželovitosti kapiláry. Kapilární viskozimetry patří do skupiny nejpresnějších přístrojů a vedle měření newtonských kapalin jsou vhodné i pro měření tokových křivek nenewtonských kapalin.



Obr. 6.1 Schéma kapilárních viskozimetrů - [2]

Pokles tlaku, který měříme na kapilárním viskozimetru, není způsoben pouze smykovými silami uvnitř kapiláry. V tlakovém rozdílu se projeví různé energetické změny, které jsou sice nežádoucí, ale v praktickém provedení se nedají úplně vyloučit. Týká se to zejména změny kinetické energie kapaliny v důsledku změny rychlosti při vstupu do kapiláry a přídatného tření (místní ztráty) ve vstupním a výstupním otvoru. Dále se mohou rušivě uplatňovat také povrchové síly, jejich vliv se dá spolehlivě eliminovat vhodnou konstrukcí. Při některých měřeních je třeba přihlížet i ke změnám tlaku a k teplotě vyvinutému při proudění kapaliny v kapiláře. U maloobjemových viskozimetrů je třeba přihlídnout i ke zbytkovému objemu kapaliny, který ulpí na stěně nádoby, takže se nezúčastní proudění v kapiláře. Schematická provedení kapilárních viskozimetrů uvádí obr. 6.1, zde je také provedeno označení hlavních rozměrů a veličin pro další výpočet.

Ze všech jmenovaných vlivů na přesnost měření se nejvíce uplatní změna kinetické energie kapaliny, proto je tento vliv vhodným způsobem korigovat. Toto se provádí tak, že se vliv změny kinetické energie vyjádří početně v rovnici (6.2), nebo se použije při měření kalibrovaných kapilár kapalinou o známé viskozitě. Může se také použít dostatečně dlouhé kapiláry, nebo se zvýší velikost tlaku v nádobce viskozimetru tak, aby vyjmenované změny byly zanedbatelné proti tlakové ztrátě třením v kapiláře.

Při výpočetní korekci vyjdeme z Bernoulliho rovnice. Za předpokladu, že pro tlakovou diferenci platí $\Delta p = p_1 - p_2$ a rychlost na hladině nádoby je nulová - $v_1 \Rightarrow 0$, potom podle obr. 6.1 pro tlakovou ztrátu platí

$$p_2 = \Delta p + \rho \cdot g \cdot h - m \frac{v_2^2}{2} \rho = \Delta p + \rho \cdot g \cdot h - m \frac{Q_v^2}{\pi^2 \cdot R^2} \rho,$$

kde m je součinitel, který vyjadřuje velikost změny kinetické energie a stanoví se cejchováním.

Vliv místní ztráty vtokem a výtokem se vyjádří pomocí ekvivalentní délky potrubí, tato se stanoví jako násobek poloměru kapiláry

$$L_{ek} = k \cdot R,$$

takže celková délka je

$$L_c = L + L_{ek} = L + k \cdot R,$$

kde k je součinitel.

S použitím posledních dvou rovnic pro dynamickou viskozitu dostaneme

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\pi \cdot (\Delta p + \rho \cdot g \cdot h) R^4}{8 \cdot Q_v (L + k \cdot R)} - \frac{m \cdot \rho \cdot Q_v}{8 \pi (L + k \cdot R)} = \\ &= \frac{\pi \cdot (\Delta p + \rho \cdot g \cdot h) R \cdot \tau}{8 \cdot V (L + k \cdot R)} - \frac{m \cdot \rho \cdot V}{8 \pi (L + k \cdot R) \cdot \tau}, \end{aligned} \quad (6.3)$$

tuto rovnici můžeme upravit na tvar

$$\tau^2 (\Delta p + \rho \cdot g \cdot h) = \frac{8 \cdot V \cdot \eta (L + k \cdot R)}{\pi \cdot R^4} \tau + m \frac{\rho \cdot V^2}{\pi^2 R^4}. \quad (6.4)$$

Tato rovnice je v souřadnicích $\tau^2 (\Delta p + \rho \cdot g \cdot h)$ proti τ přímka, odkud pro kapalinu známé viskozity snadno určíme oba neznámé korekční součinitele „ k “ a „ m “. Tuto rovnici můžeme dále ještě převést na tvar

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = A \cdot \tau - \frac{B}{\tau}, \quad (6.5)$$

kde A - je tzv. kalibrační konstanta

B - korekce na kinetickou energii

τ - doba výtoku kapaliny

Obě konstanty se snadno určí kalibrací kapalinou známé viskozity

Pokud nechceme provádět kalibraci kapilárního viskozimetru, můžeme postupovat tak, že provedeme jedno měření s kapalinou, jejíž viskozitu známe např. voda a druhé měření provedeme s kapalinou, jejíž viskozitu chceme stanovit. Označme veličiny kapaliny známé viskozity indexem 1 a pro parametry neznámé kapaliny pak použijeme index 2. Pro obě měření použijeme viskozimetr se stejným objemem nádoby V , potom z Hagen – Poiseuilleovy rovnice vypočítáme

$$\nu = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p_1 \cdot \tau_1}{8 \cdot \eta_1 \cdot L} = \frac{\pi \cdot R^4 \cdot \Delta p_2 \cdot \tau_2}{8 \cdot \eta_2 \cdot L},$$

odkud

$$\frac{\Delta p_1 \cdot \tau_1}{\eta_1} = \frac{\Delta p_2 \cdot \tau_2}{\eta_2},$$

neboť geometrické parametry viskozimetru jsou pro obě kapaliny shodné.

Je-li trubice - kapilára viskozimetru svislá a proudění je vyvoláno pouze hydrostatickým tlakem, potom z předcházející rovnice dostaneme

$$\rho_1 g \cdot \Delta h \frac{\tau_1}{\eta_1} = \rho_2 g \cdot \Delta h \frac{\tau_2}{\eta_2},$$

odkud

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

Z této rovnice pro hledanou dynamickou nebo kinematickou viskozitu dostaneme vztah

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{\tau_2 \cdot \rho_2}{\tau_1 \cdot \rho_1} \Rightarrow \nu_2 = \nu_1 \frac{\tau_2}{\tau_1} \quad (6.6)$$

Tato metoda relativního stanovení viskozity je v praxi často používána.

Nenewtonské kapaliny - při měření viskozity nenewtonských kapalin se používají kapilární viskozimetry – [4], potřebný tlakový spád se vytváří různou výškou měrné kapaliny, tlakem inertního plynu nebo zatěžovaným pístem – [4]. Při měření se zjišťuje celá toková křivka, tzv. reogram. Měří se objemový průtok a tlakový spád, udržování konst. tlaku je výhodnější než udržování konst. průtoku.

Přímo měřitelné veličiny jsou pak objemový průtok Q_v a tlakový spád Δp na měrné kapiláře o poloměru R a délkou L . Z těchto hodnot lze vypočítat konzistenční proměnné a to smykové napětí a gradient rychlosti na stěně a zdánlivou viskozitu podle rovnic

$$\tau_s = \frac{\rho_z R}{2L}; \quad j_s = \frac{4Q_v}{\pi R^3} = \frac{4Q_v}{SR} = \frac{4v}{R}; \quad \eta_a = \frac{\tau_s}{j_s} = \frac{2 \cdot \Delta p \cdot Q_v}{\pi \cdot L \cdot R^2}$$

Na takto naměřený reogram se aplikuje některý reologický model, který s nejmenší chybou aproximuje změřenou závislost.

Pro mocninovou rovnici toku lze pro objemový průtok odvodit rovnici

$$Q_v = \pi \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\rho_z R}{2LK} \right)^{\frac{1}{n}} R^3 = \pi \frac{n}{3n+1} \left(\frac{\tau_s}{K} \right)^{\frac{1}{n}} R^3 \quad (6.7)$$

Z posledních tří rovnic, pro smykové napětí na stěně kapiláry dostaneme

$$\tau_s = K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n j_s^n, \quad (6.8)$$

odkud pro logaritmování platí

$$\log \tau_s = \log K + n \cdot \log \frac{3n+1}{4n} + n \cdot \log j_s, \quad (6.9)$$

což je v souřadnicích τ_s a j_s přímka, její směrnici je přímo index toku „n“ měřeného vzorku a z úseku na ose pořadnic pro gradient rychlosti $j_s = 1$ najdeme hodnotu výrazu

$$K \left(\frac{3n+1}{4n} \right)^n,$$

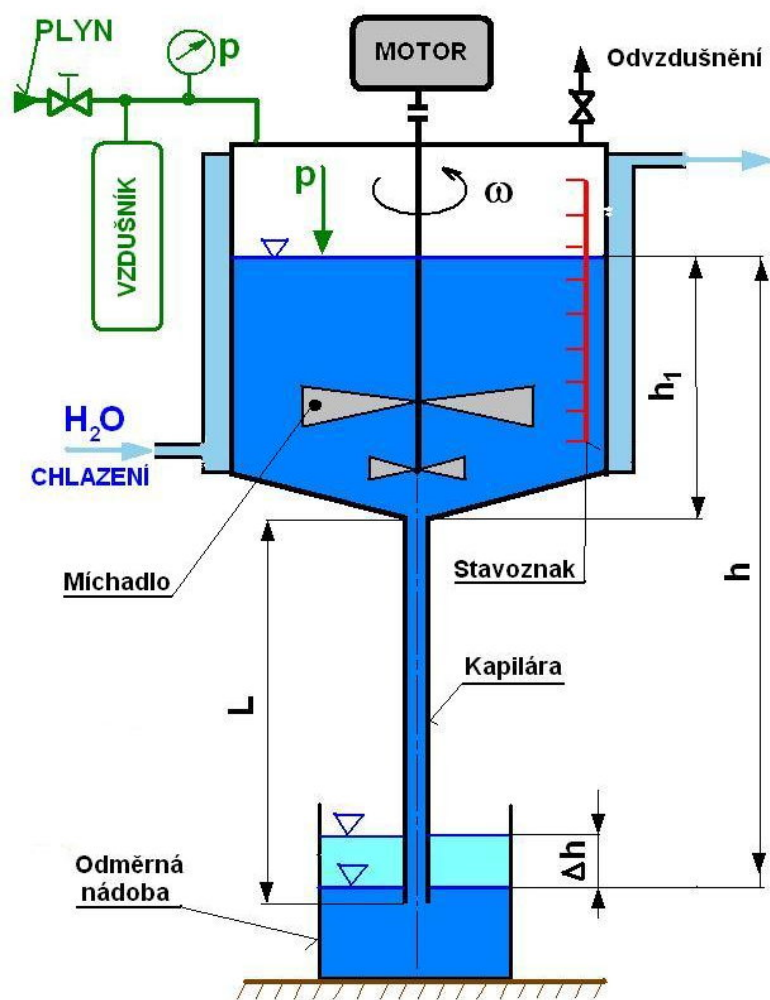
z něj pomocí známé hodnoty indexu toku „n“ vypočteme velikost součinitele konsistence „K“. Obdobně se postupuje při vyhodnocování i v případě použití ostatních rovnic toku.

Kapilární viskozimetr přetlakový - jedno z možných řešení kapilárního přetlakového viskozimetru – [4], který je vhodný i pro měření reogramu suspenzí, je uveden na obr. 6.2. Kapilára je např. pomocí převlečné matice připojena do kuželového víka s uzávěrem. Nádoba viskozimetru je opatřena vnějším pláštěm, čímž je umožněno temperování vzorku pomocí proudící vody udržované na konstantní teplotě termostatem. Plyn se přivádí do nádoby viskozimetru přes redukční ventil, max. tlak může dosahovat hodnoty několik MPa. K omezení pulsací tlaku je do přívodního potrubí plynu zapojen vzdušník. Nádoba viskozimetru je opatřena míchadlem, poháněné elektrickým motorem, nálevným otvorem a měřítkem

výšky hladiny. Objemový průtok se obvykle měří buď pomocí stopek a odměrné nádoby, nebo vážením, což je přesnější.

Celkový tlakový spád se skládá z tlaku plynu na hladině a hydrostatického tlaku. Není-li kolísání hladiny ve viskozimetru během jednoho měření velké, může se zanedbat a do výpočtu je možné zahrnout průměrnou výšku při jednotlivých měřeních.

Přímým výsledkem měření na kapilárním viskozimetru je soustava údajů tlakového spádu a k němu příslušného průtoku. Jako první se nejdříve určí τ_s a j_s a nakreslí se renogram. Jedná-li se o kapalinu nenewtonskou pokusíme se interpretovat některou rovnicí toku, obvykle mocninovou rovnicí Oswald-de Waeleovu.

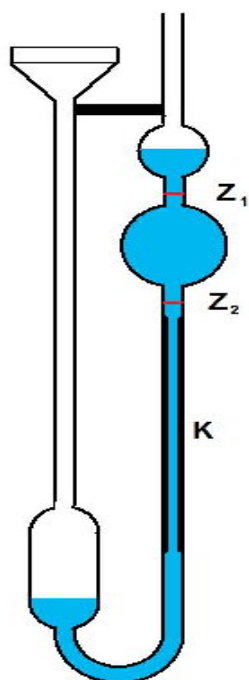


Obr. 6.2 Přetlakový kapilární viskozimetr

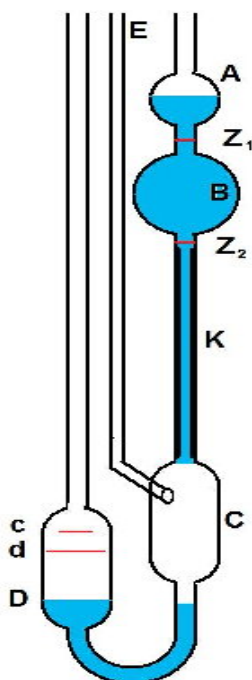
Při použití kapilárních viskozimetrů, jak již bylo uvedeno, je nejdůležitější dodržet laminární proudění v kapiláře, nedoporučuje se však pracovat až po kritickou hodnotu $Re=2300$ a měření provádět do hodnoty $Re=1000$, jinak vzniká nebezpečí vzniku rušivých vírů. U kapilárních viskozimetrů můžeme obvykle měřit objemový průtok a tlakový spád vzniklý na kapiláře. Obr. 6.3 uvádí různá provedení skleněných kapilárních viskozimetrů, v dalším textu budou podrobněji popsány viskozimetr Ostwaldův, Ubbelod a Vogel-Ossag – [4].



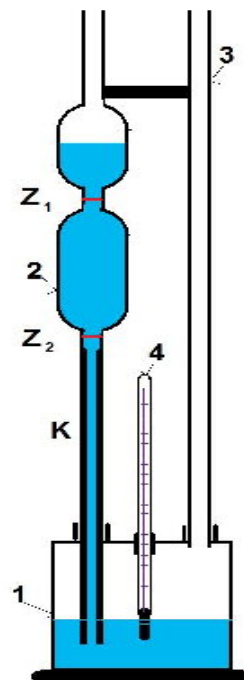
Obr. 6.3 Ukázka provedení skleněných kapilárních viskozimetrů



Obr. 6.4 Viskozimetr Ostwaldův



Obr. 6.5 viskozimetr Ubbelohde



Obr. 6.6 Viskozimetr Vogel-Ossag

Viskozimetr Ostwaldův – obr. 6.4 – při měření tímto viskozimetrem se postupuje tak, že se do levé trubice nalije určitý objem měřené kapaliny, tato se nasaje hadičkou nasazenou na pravou trubici asi do poloviny horní nádoby nad horní rysku Z_1 . Nato se změří doba, za kterou vlastní tíhou proteče kapilárou „K“ známý objem tekutiny mezi značkami Z_1 a Z_2 . Viskozita se vypočte z rov. (6.4), rov. (6.5) nebo rov. (6.6). Viskozimetr se vyrábí s různým průměrem kapiláry, proto je možné měřit viskozity kapalin v širokém intervalu viskozit.

Viskozimetr Ubbelohdův – obr. 6.5 – měření viskozity se provádí tak, že se trubicí 1 nalije do viskozimetru tolik kapaliny, aby hladina ležela v nádobce D mezi značkami c – d. Po vytemperování vzorku nasajeme měrnou kapalinu do poloviny baňky A, přičemž trubka 2 je vhodně uzavřena. Pak se uvolní otvory trubic 2 a 3 a měřená kapalina se nechá volně

stékat a měří se doba průchodu mezi ryskami $Z_1 - Z_2$. Viskozita se vypočte z rov. (6.4), rov. (6.5) nebo rov. (6.6). Viskozimetr se vyrábí s různým průměrem kapilár, každá kapilára je vhodná pouze pro určitý rozsah kinematické viskozity

Viskozimetr Vogel – Ossag – sestává podle obr. 6.6 z nádoby se zkoušenou kapalinou 1, skleněné kapiláry K s připojenými nádobkami kulového tvaru 2, odsávacího zařízení nebo přívodu tlakového média 3 a teploměru 4. Kinematická viskozita se měří tak, že odsávacím zařízením – pumpičkou se zvedne hladina měrné kapaliny nad značku Z_1 a pak po odpojení pumpičky se měří doba τ_1 poklesu hladiny mezi značkami $Z_1 - Z_2$. Kinematická viskozita se vypočte z rov. (6.4), rov. (6.5) nebo rov. (6.6), nebo z rovnice

$$\nu = k_1 \cdot \tau_1,$$

kde k_1 je konstanta určená cejchováním, nebo je udaná výrobcem

Dynamická viskozita se měří připojením nátrubku 3 na zdroj tlaku odpovídající účinku kapalinového sloupce $h = 60 \pm 2 \text{ mm H}_2\text{O}$ a měří se doba τ_2 vzestupu hladiny kapaliny mezi značkami $Z_2 - Z_1$. Dynamická viskozita se vypočítá z rovnice (6.4), rov. (6.5) nebo rov. (6.6), nebo z rovnice

$$\eta = c \cdot \tau_2,$$

kde c je konstanta určená cejchováním, nebo je udaná výrobcem.

Kapilární viskozimetr s pístem - vzorek měřené kapaliny je nasáván pístem přes kalibrovanou ocelovou kapiláru. Měřena je tlaková diference, rychlost pohybu pístu nebo objemový průtok a teplota vzorku. Z tlakové diference na definované délce a průměru kapiláry (tlakové ztráty) je stanovena viskozita vzorku např. z rov. (6.2). Je možná i varianta, že píst vytlačuje měřenou kapalinu přes kapiláru a z naměřené tlakové diference a parametrů kapiláry se ze stejné rovnice vypočítá viskozita měřené kapaliny.

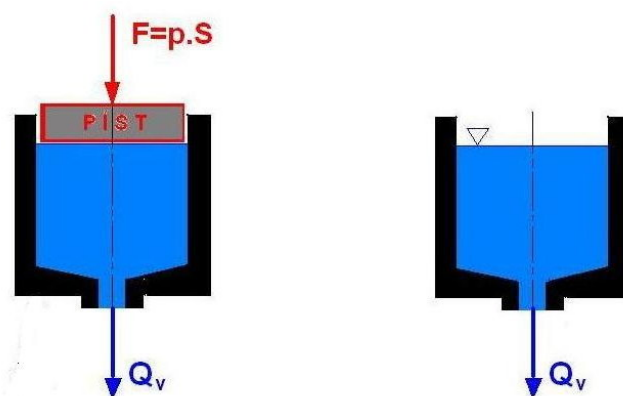
7. Výtokový viskozimetr

Výtokové viskozimetry stejně jako kapilární vychází z Hagen – Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici kruhového průřezu – [4]. Protože délka kapiláry je vzhledem k jejímu průměru krátká, velká část polohové nebo tlakové energie se spotřebuje na krytí ztrát vtokem i výtokem, na kinetickou energii, ale rovněž i na vytvoření parabolického rychlostního profilu v trubici – kapiláře. Rozběhová dráha při laminárním proudění v trubici kruhového průřezu je dána empirickou rovnicí

$$\frac{x}{d} = 0,065 \cdot \text{Re}.$$

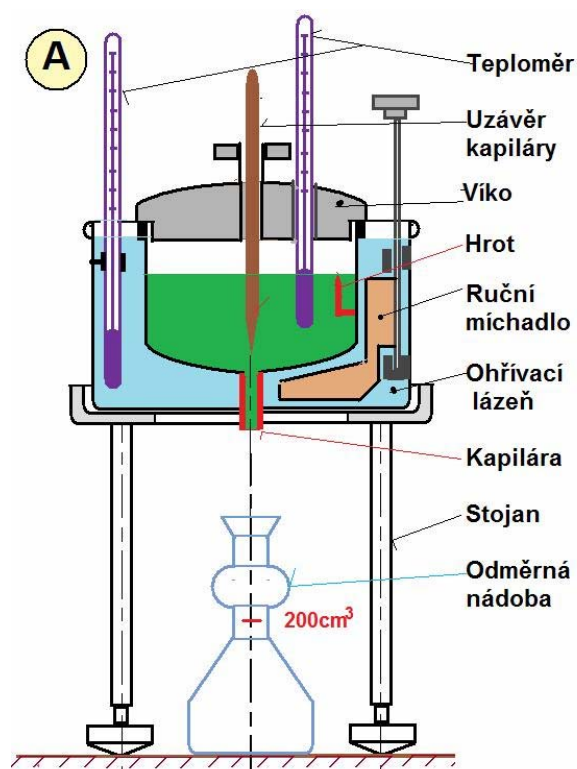
Pro $\text{Re} = 1000$ a $d = 2,5 \text{ mm}$ je rozběhová dráha $x = 165 \text{ mm}$, toto je hodnota srovnatelná s délkou kapilár používaných u výtokových viskozimetrů

Početně je obtížné tuto energii stanovit, proto u těchto viskozimetrů se postupuje tak, že se změří doba výtoku definovaného objemu vody (nebo jiné vhodné kapaliny) při zvolené teplotě a pak se změří doba výtoku stejného objemu měrné kapaliny opět při zvolené teplotě. Viskozita se stanoví relativně jako poměr těchto dvou naměřených časů, nebo měřítkem viskozity je naměřená doba výtoku. Tyto viskozimetry se prakticky provádějí tak, že výtok měřené kapaliny se uskuteční tlakem pístu nebo plynu na hladinu kapaliny ve viskozimetru, častěji se výtok uskuteční vlastní tíhou - obr. 7.1.



Obr. 7.1 Schéma výtokových viskozimetrů - [2]

Viskozimetr Eulerův – obr. 7.2 – viskozimetr se skládá z válcové nádoby průměru 106 mm uvnitř pozlacené, nádoba je opatřena výtokovou trubičkou – kapilárou délky 20 mm vnitřního průměru 2,9 mm, který se mírně zužuje na průměr 2,8 mm. Nádoba je přikryta nahoře dvojitým víkem. Shora je kapilára uzavřena tyčinkou (dřevěnou nebo plastovou) ukončenou hrotem nebo kuličkou. Nádoba je obklopena vodní lázní, která se dá elektricky vyhřát na požadovanou teplotu. Měřená kapalina se nalije do nádoby v takovém množství (240 cm³), aby sahala ke třem hrotům na stěně nádoby.



Obr. 7.2 Englerův viskozimetr

A – řez viskozimetrem; B – starší provedení viskozimetru

Viskozita ve stupních Englera – °E se určuje jako poměr doby výtoku τ objemu 200 cm³ zkoumané kapaliny při dané (zvolené) teplotě k době výtoku τ_v stejného objemu 20 °C teplé destilované vody. Doba se měří od vytažení tyčinky uzavírající kapiláru, až do okamžiku, kdy vyteče 200 cm³ kapaliny. Doba výtoku destilované vody při teplotě 20 °C má být $\tau_v = 50$ až 52 s.

Viskozita v Eulerových stupních - °E je určena poměrem časů

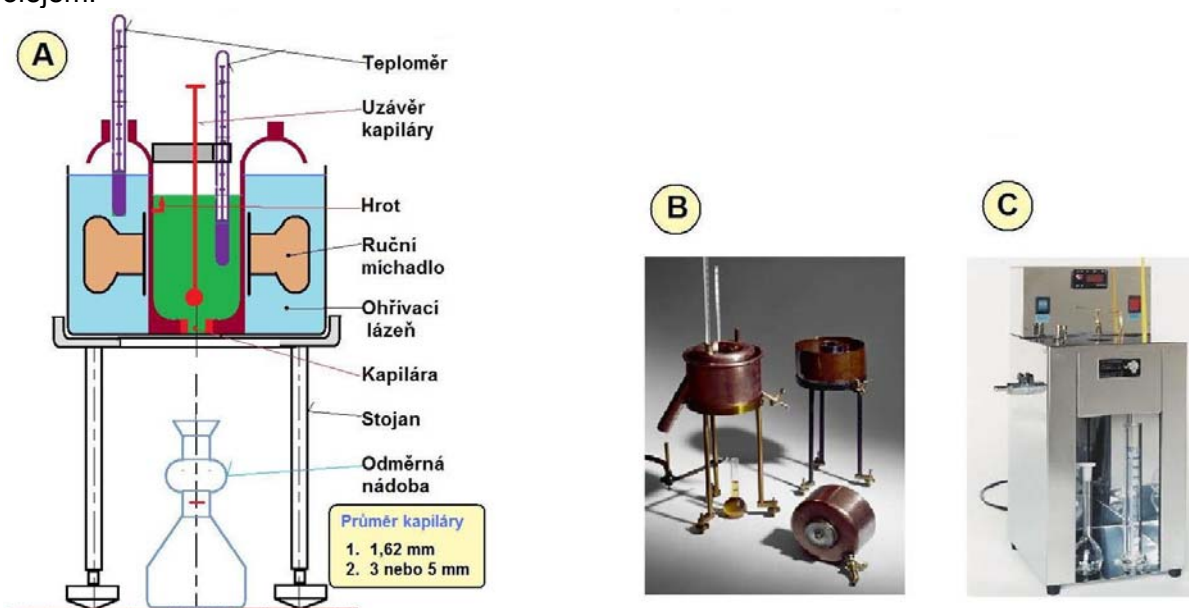
$$E = \frac{\tau}{\tau_v} \quad (7.1)$$

K přepočtu stupňů Eulera na kinematickou viskozitu v jednotce [m²/s] je možné použít empirické rovnice

$$\nu = \left(7,31 \cdot 10^{-6} E - \frac{6,31}{E} \right) \cdot 10^{-6}; \quad \nu = \frac{E}{100} \cdot 7,6 \left(1 - \frac{1}{E^2} \right) \cdot 10^{-6} \text{ - m}^2/\text{s} \quad (7.2)$$

Eulerův viskozimetr patří mezi přístroje s velkou přesností i reprodukovatelností. Temperování měřeného vzorku trvá cca 15 až 25 minut a nesmí se uspěchat, Teploměr v měřené lázni a temperující vodě musí ukazovat stejnou teplotu. Měřenou kapalinu v nádobě nelze míchat, naopak temperující voda se musí ručně míchat zabudovanou otočnou lopatkou. Eulerův viskozimetr se používá v Evropě i jako standart.

Viskozimetr Redwoodův - obr. 7.3 - viskozimetr se skládá z nádoby, do které se dává měřená kapalina – olej, nádoba je opatřena hroty, které zajišťují konstantní objem měřené kapaliny ve viskozimetru. Ve dně nádoby je achátová tryska, uzavírána ručně kuličkou, tato se ručně zvedne na začátku měření viskozity. Nádoba je ponořena do nádoby s vodou, která zajišťuje ohřev a temperování vzorku pomocí el. topné spirály. Vodu je možné v nádobě míchat, měřená kapalina se míchá ručně drátkem, proto je nutné temperování provádět dostatečně dlouhou dobu. Pro teplotu nad 100°C se temperování provádí válcovým olejem.



Obr. 7.3 Viskozimetr Redwoodův – [15]

A. zjednodušený řez viskozimetrem; B. provedení viskozimetru z roku 1885
C. novější provedení viskozimetru

Měření viskozity se provádí tak, že se změří doba výtoku 50 cm³ měřené kapaliny, naměřená doba je měřítkem velikosti viskozity. Pro převod kinematické viskozity měřené Redwoodovým viskozimetrem platí rovnice (7.3), tato je analogická s rovnicí (6.5)

$$\nu = A \cdot \tau - \frac{B}{\tau} \quad (7.3)$$

kde ν - kinematická viskozita - cSt
A - konstanta přístroje
B - konstanta přístroje
 τ - doba výtoku – s

Konstanty viskozimetru v této rovnici jsou následující:

$$\begin{aligned} A &= 0,264; \quad B = 190 && \text{pro } \tau = 40 \text{ až } 85 \text{ sec.} \\ A &= 0,247; \quad B = 65 && \text{pro } \tau = 85 \text{ až } 2000 \text{ sec} \end{aligned}$$

Viskozimetr se vyrábí ve dvou velikostech:

Číslo 1 - průměr kapiláry 1,62 mm, délka 10 mm

Číslo 2 - průměr kapiláry 3,5 mm, délka 5 mm

Viskozimetr č. 1 je používán, když doba výtoku měřené kapaliny je menší než 2000 sekund a naopak. To znamená, že rozdíl měřených časů pro stejnou kapalinu je u viskozimetru č. 1 10 krát větší než u viskozimetru č. 2.

Viskozimetr Sayboltův - obr. 7.4 - při měření tímto viskozimetrem se postupuje tak, že se změří doba výtoku 60 cm³ měřené kapaliny, naměřená doba pak je číslo SUS - Saybolt Universal Seconds, označení číslo SUS je identické s označením číslo SSU - Seconds Saybolt Universal.

Viskozimetr se vyrábí ve dvou provedeních, a to viskozimetr označený jako:

číslo 1 - průměr kapiláry 1,765 ± 0,015 mm, délka 12,25 mm,

nebo viskozimetr označený jako

číslo 2 - průměr kapiláry průměr kapiláry 3,15 ± 0,02 mm, délka 12,25 mm.

Viskozimetr č. 1 se používá pro měřené kapaliny, pokud doba výtoku je menší než 500 sekund, při čemž minimální doba výtoku je 30 sekund.

V opačném případě, když čas výtoku je větší než 500 sekund, potom se použije viskozimetr č. 2, - průměr kapiláry průměr kapiláry 3,15 ± 0,02 mm, délka 12,25 mm, potom se pro měřenou viskozitu užívá označení SSF - Saybolt Seconds Furol (Furol je zkratka pro paliva a motorové oleje), jeden SSU = 0,1 SSF.

Přepočet SSU na jednotku centi Stokes se provede podle následujících rovnic

$$\begin{aligned} \nu_{cSt} &= 0,226 \cdot \nu_{SSU} - \frac{195}{\nu_{SSU}} && \text{pro } \nu_{SSU} < 100 \\ \nu_{cSt} &= 0,220 \cdot \nu_{SSU} - \frac{135}{\nu_{SSU}} && \text{pro } \nu_{SSU} > 100. \end{aligned}$$

Přepočet dynamické cP na kinematickou viskozitu SSU se provede podle následující rovnice

$$\nu = 4,63 \cdot \frac{\eta}{\rho}$$

kde ν - kinematická viskozita SSU

η - dynamická viskozita cP

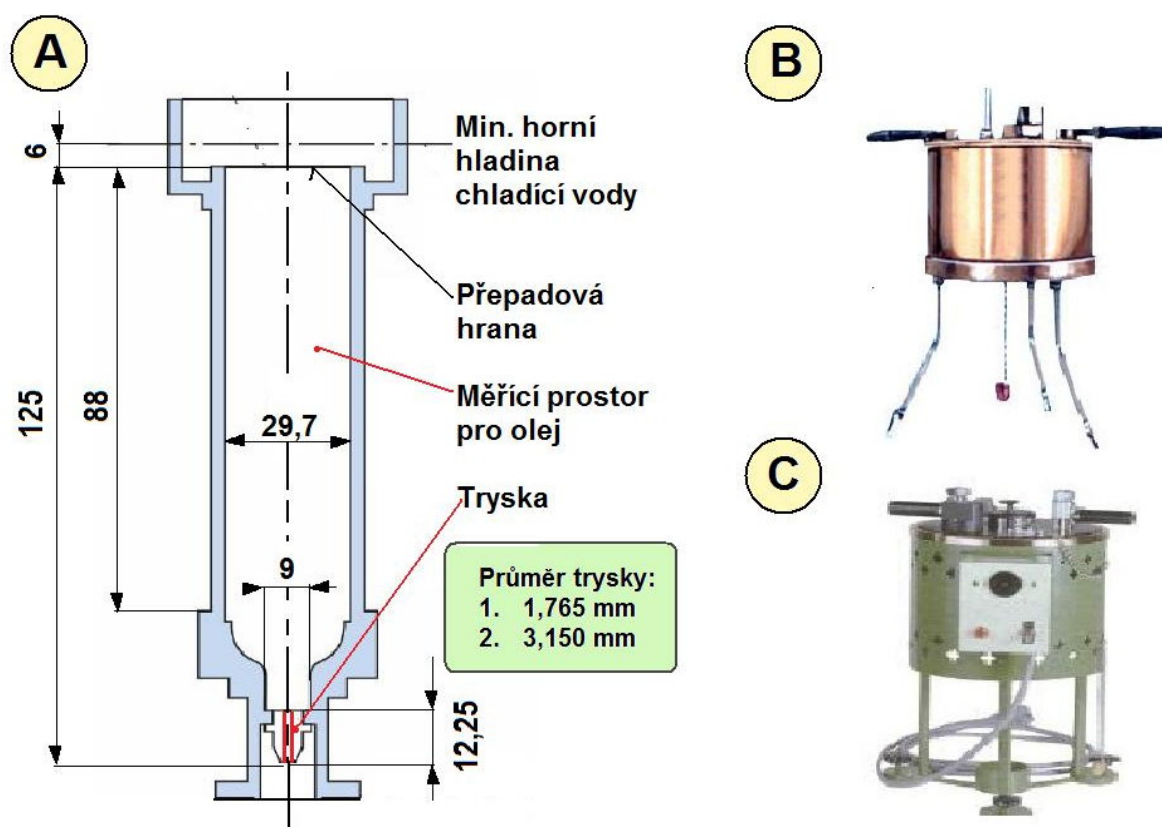
ρ - hustota - g/cm³.

Přibližně platí vztah mezi jednotkou cSt a SSU :

- pro kapaliny $\nu > 50$ cSt při teplotě $t = 37,8^\circ\text{C}$ jeden SSU = 0,2158 cSt = 0,2158 mm²/s

- pro kapaliny $\nu > 500$ cSt při teplotě $t = 50^\circ\text{C}$ jeden SSF = 2,120 cSt = 2,120 mm²/s.

Měření viskozimetrem Saybolt je užíváno hlavně v USA a provádí se podle metody ASTM D 88.



Obr. 7.4 Viskozimetr Sayboltův – [14]
A. řez měřicí nádobkou; B. starší provedení viskozimetru;
C. novější provedení viskozimetru

8. Tělíkové viskozimetry

Viskozimetry tohoto typu jsou založeny na rychlosti pádu tělíka, nejčastěji hladké koule ve zkoumané tekutině. Předpokládejme, že se koule o průměru „d“ a hustoty ρ_k pohybuje ustálenou rychlostí w (tato rychlost se také nazývá sedimentační nebo pádová) vlastní tíhou v kapalině podle obr. 8.1, kapalina má hustotu ρ_v a dynamickou viskozitu η . Kapalina zaujímá nekonečně velký poloprostor. Na pohybující se kouli podle obr. 8.1 působí tíhová síla G , vztlaková síla F_v a odporová síla F_o , protože se předpokládá rovnoměrná pádová rychlost, je setrvačná síla nulová – $F_s = 0$.

Potom pro rovnováhu sil platí

$$G = F_v + F_o, \quad (8.1)$$

$$\text{kde } G = \frac{\pi d^3}{6} g \rho_p; \quad F_v = \frac{\pi d^3}{6} g \rho_v; \quad F_o = c_x \frac{\pi d^2}{4} \frac{w^2}{2} \rho_v,$$

a po dosazení za jednotlivé síly dostaneme

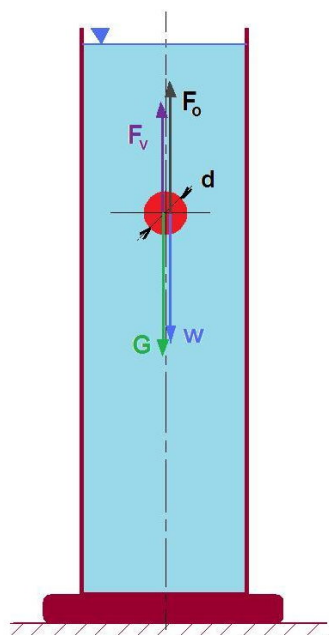
$$\frac{\pi d^3}{6} g \rho_p = \frac{\pi d^3}{6} g \rho_v + c_x \frac{\pi d^2}{4} \frac{w^2}{2} \rho_v, \quad (8.2)$$

odkud pro sedimentační rychlost

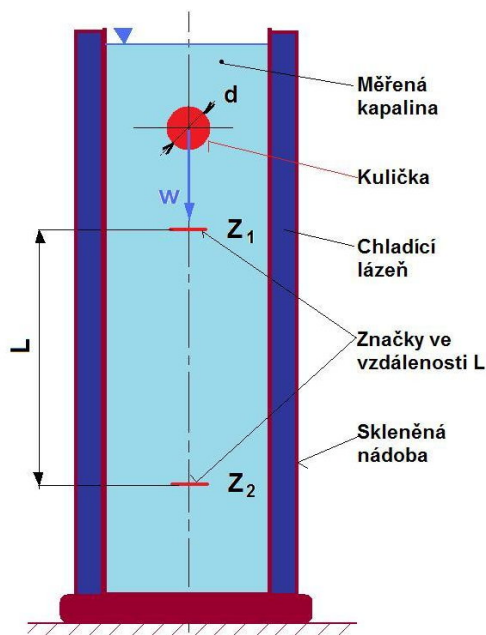
$$w = \sqrt{\frac{4d(\rho_p - \rho_v)g}{3c_x\rho_v}}. \quad (8.3)$$

Definujme Reynoldsovo číslo sedimentace

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_v}{\eta} \quad (8.4)$$



Obr. 8.1 Rovnováha sil při pohybu částice



Obr. 8.2 Schéma Stokesova viskozimetru

Je-li $Re \leq 1$, potom se jedná o laminární otékání koule a součinitel odporu podle Stokesa je definován rovnicí

$$c_x = \frac{24}{Re} \quad (8.5)$$

S využitím posledních dvou rovnic pro odporovou sílu dostaneme vztah, označovaný také jako Stokesův zákon.

$$F_o = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot w = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d \cdot w \quad (8.6)$$

Z rovnice (8.2) a (8.6) pro dynamickou viskozitu po jednoduchých úpravách odvodíme rovnici

$$\eta = \frac{d^2(\rho_k - \rho_v) \cdot g}{18 \cdot w} = \frac{2 \cdot r^2(\rho_k - \rho_v) \cdot g}{9 \cdot w} \quad (8.7)$$

Budeme-li měřit pádovou rychlost kuličky jako proběhnutou dráhu za čas

$$w = \frac{L}{\tau},$$

Potom se předcházející rovnice pro dynamickou viskozitu upraví na tvar

$$\eta = \frac{d^2(\rho_k - \rho_v) \cdot g}{18 \cdot L} \cdot \tau = \frac{2 \cdot r^2(\rho_k - \rho_v) \cdot g}{9 \cdot L} \cdot \tau = k \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot \tau \quad (8.8)$$

Z této rovnice můžeme vypočítat velikost dynamické viskozity tekutiny, za předpokladu, že změříme čas τ potřebný pro proběhnutí kuličky na dráze L . Pro danou vzdálenost L a průměr kuličky „ d “ se předcházející rovnice zjednoduší

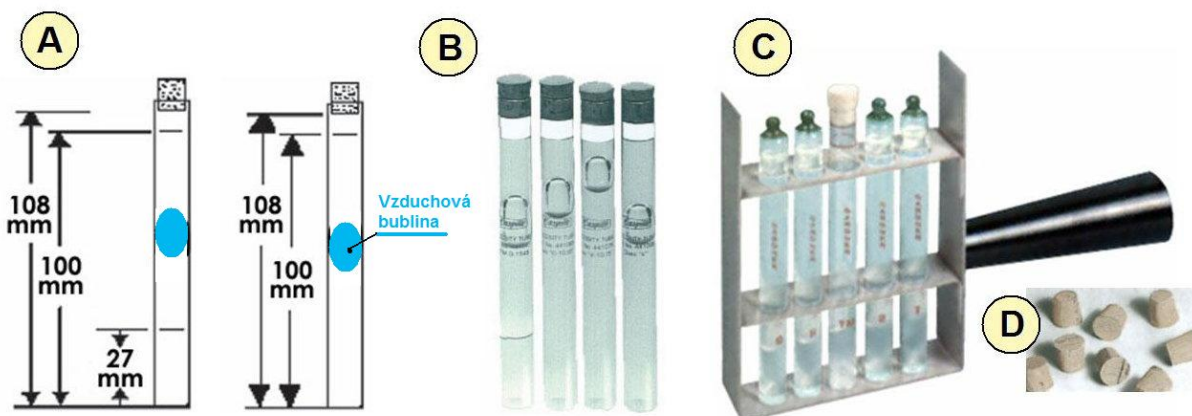
$$\eta = k \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot \tau \quad (8.9)$$

kde k je konstanta viskozimetru.

Viskozimetr Stokesův – patří mezi nejjednodušší tělískové viskozimetry – obr. 8.2. Viskozimetr je v podstatě skleněný válec naplněný měřenou kapalinou, na válci jsou vyznačeny dvě rysky, jejich vzdálenost je L , stopkami se změří čas průchodu kuličky mezi dvěma ryskami a z rovnice (8.7) se pro známou hustotu kuličky a měřené kapaliny vypočítá velikost dynamické viskozity. Celé zařízení je možné vhodně temperovat a potom se dá měřit dynamická viskozita i jako funkce teploty. U tohoto viskozimetru je třeba dodržet podmínku, že průměr kuličky je výrazně menší, než je průměr válce.

Viskozimetr bublinkový – obr. 8.3 - u tohoto viskozimetru je kulička nahrazena vzduchovou bublinou, rychlost stoupaní bubliny je měřítkem viskozity. Základem viskozimetru je skleněná trubička průměru 10,65 mm nebo 10,75 mm, trubička má dvě rysky podle obr. 8.3A. Trubička se naplní měřenou kapalinou až po rysku, tato je ve vzdálenosti 100 mm od dna. potom se trubička uzavře korkovou zátkou tak, aby spodní plocha zátky byla od dna trubičky vzdálena o 108 mm. Prostor mezi hladinou měřené kapaliny a zátkou je vyplněn vzduchem, jeho objem je tedy přesně definován. Temperování se provádí ponořením trubiček např. do vody o známé teplotě. Měření viskozity se provádí dvojím způsobem:

relativní měření – v tomto případě se viskozity měřené kapaliny stanoví relativně s viskozitou známé kapaliny. Do stojánu podle obr. 8.3C se vloží několik trubiček se známou viskozitou a současně se vloží trubička s měřenou kapalinou. Stojánek se otočí o 180° , vzduchové bubliny se přesunou nahoru, pak se stojánek s trubičkami otočí zpět o 180° a sleduje se pohyb bublin v trubičkách. Měřená kapalina má pak viskozitu stejnou jako má kapalina v trubičce, ve které bubliny proběhla dráhu 100 m za stejný čas jako u měřené kapaliny. Viskozimetr obsahuje cca 20 trubiček s kapalinou známé, ale rozdílné viskozity, dá se tedy relativně stanovit viskozita měřené kapaliny. Když se vzduchová bublina pohybuje rychleji než bublina ve vzorku, potom má měřená kapalina viskozitu menší a naopak.



Obr. 8.3 Bublinkový viskozimetr – [16]

A – rozměry trubičky, B – ukázka trubiček, C – stojan s trubičkami, D – korkové zátky

absolutní měření – v tomto případě se měří doba, za kterou vzduchová bublina projde mezi dvěma ryskami 27 a 100 mm, tj., za jaký čas urazí dráhu 73 mm. Viskozita se stanoví tak, že 1 sekunda odpovídá viskozitě 1 Stokes.

U viskozimetru se dá očekávat následující relativní nejistota – chyba:

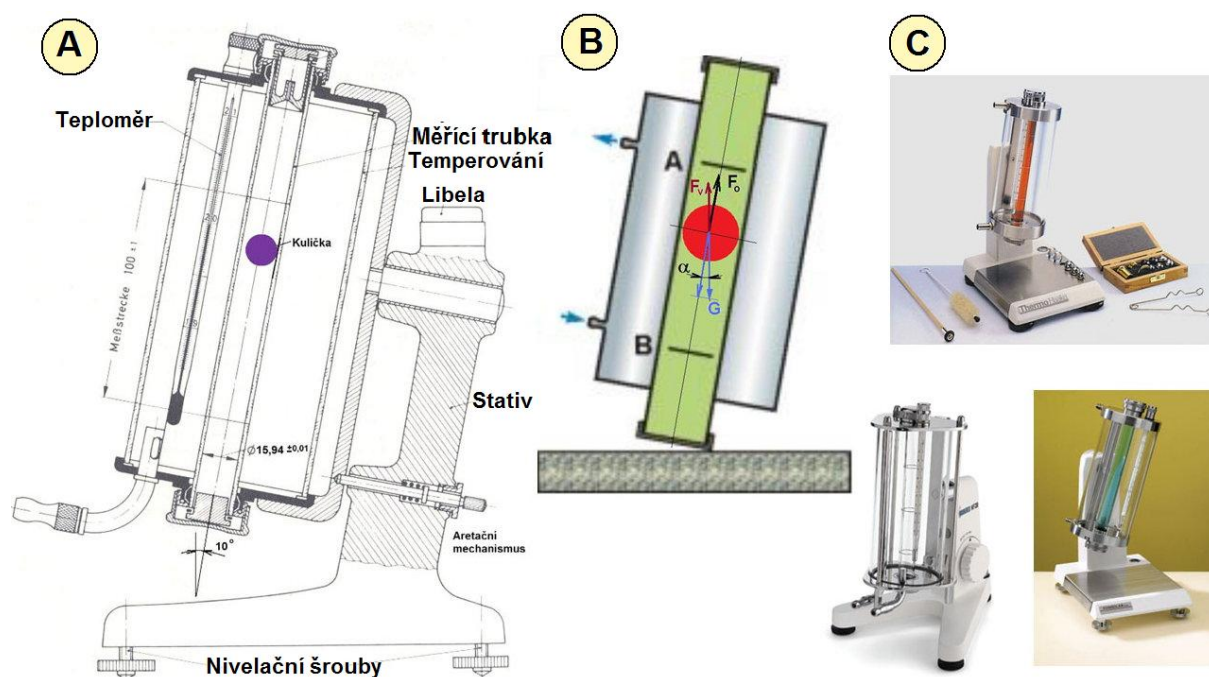
Vliv teploty – změna o 1°C relativní chyba 10%

Vliv sklonu trubky o 5° relativní chyba 10%

Vliv výšky hladin 0,1 mm relativní chyba 2%

Höpplerův viskozimetr – obr. 8.4 - u tohoto viskozimetru padá kulička ve skleněné trubici skloněné od vertikály o 10° . Výměna kuličky je velmi snadná, viskozimetr se vyznačuje jednoduchou konstrukcí, snadnou obsluhou při měření, relativně vysokou přesností a opakovatelností měření. Viskozimetr se skládá z kalibrované skleněné trubice, ve které padá kulička v měřené kapalině, trubice je opatřena dvěma ryskami, mezi kterými se měří doba

průchodu kuličky známého průměru. Kuličky jsou skleněné nebo kovové, různého průměru, tím je umožněno měření v širokém intervalu viskozity.



Obr. 8.4 Höpplerův viskozimetr - { 17 }

A. řez viskozimetrem, B. schéma, C. ukázka vyráběných viskozimetrů

Pro rovnováhu sil při pohybu kuličky v šikmé trubce podle obr. 8.4B platí

$$G \cdot \cos \alpha = F_v \cdot \cos \alpha + F_o,$$

po dosazení za jednotlivé síly a úpravách provedených v části o Stokesově viskozimetru je dynamická viskozita dána vztahem

$$\eta = \frac{d^2(\rho_k - \rho_v) \cdot g \cdot \cos \alpha}{18 \cdot w} = \frac{2 \cdot r^2(\rho_k - \rho_v) \cdot g \cdot \cos \alpha}{9 \cdot w}$$

Protože průměr kuličky a měřicí trubice se od sebe příliš neliší, výpočet podle této rovnice je zatížen velkou chybou, dynamická viskozita se proto vypočítá z rovnice

$$\eta = k \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot \tau, \quad (8.10)$$

kde η - dynamická viskozita

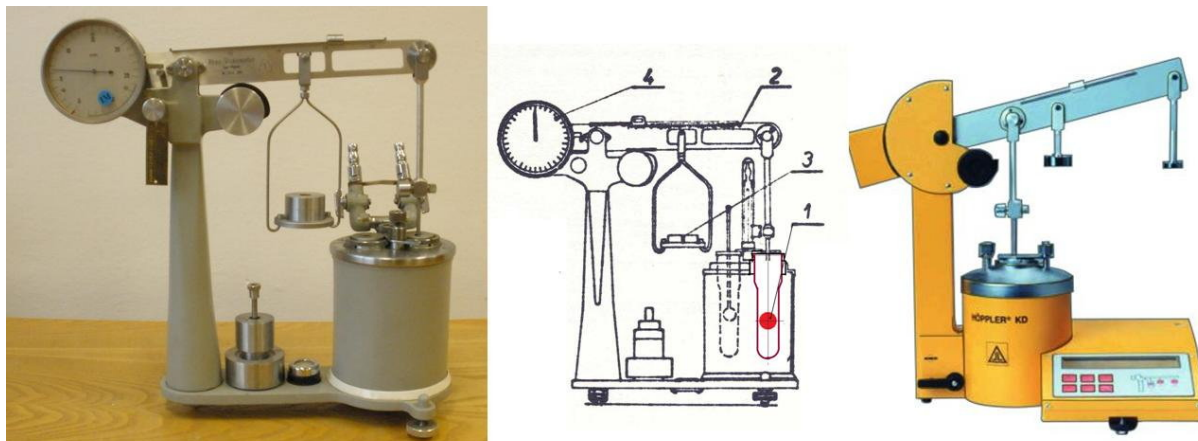
k - konstanta viskozimetru, je stanovena pro každou kuličku výrobcem, nebo je stanovena cejchováním v kapalině známé viskozity

ρ_k, ρ_v - hustota kulička a měřené kapaliny

Měřicí skleněná trubice je obklopena další trubicí většího průměru, do vzniklého mezikruží lze přivádět chladicí lázeň z termostatu a tím temperovat vzorek měřené kapaliny a provádět měření viskozity při různých teplotách. Pro snadnější manipulaci je viskozimetr proveden tak, že hlavice viskozimetru je otočná okolo vodorovné osy, tím je umožněno po měření přesunutí kuličku do horní polohy a měření opakovat, aniž je nutné kuličku z měřicí trubice vyndávat. Na obr. 8.4A je uveden řez a na obr. 8.4C je pohled na Höpplerův viskozimetr.

Reoviskozimetr s tlačnou kuličkou - obr. 8.5 – tento přístroj se používá pro měření velkých viskozit i pro neneutonské kapaliny. Viskozimetr sestává z kalibrované trubice, ve které se nachází měřená kapalina, do kapaliny je protlačována kulička - 1. Kulička je pevně spojena s vahadlem – 2 pomocí tyčinky, na vahadlo se vkládá závaží - 3, čímž je kulička

protlačována do kapaliny. Pomocí vhodného indikátoru - 4 je měřena dráha kuličky a současně je měřen čas, potřebný pro proběhnutí kuličky na zvolené dráze.



Obr. 8.5. Reoviskozimetr s tlačnou kuličkou – [20]

Viskozita se vypočítá z rovnice

$$\eta = k_1 \cdot P \cdot \tau, \quad (8.9)$$

kde η - dynamická viskozita

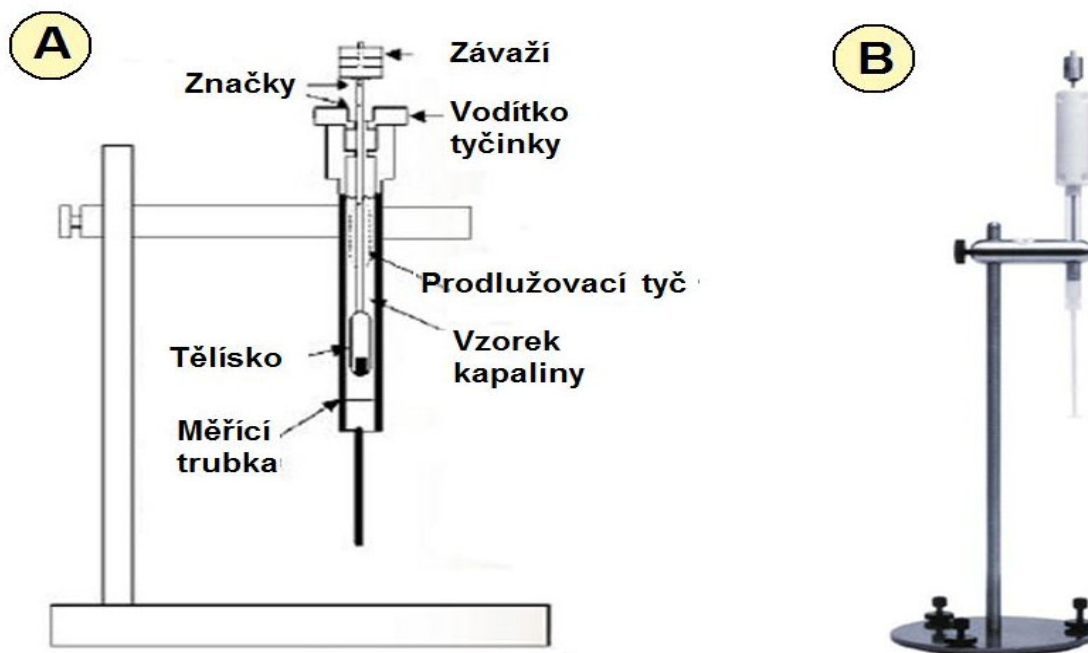
k_1 - konstanta viskozimetru, je stanovena výrobcem, závisí na velikosti kuličky a na průměru nádoby, nebo je stanovena cejchováním v kapalině známé viskozity

P - velikost závaží

τ - doba poklesu kuličky o stanovenou dráhu

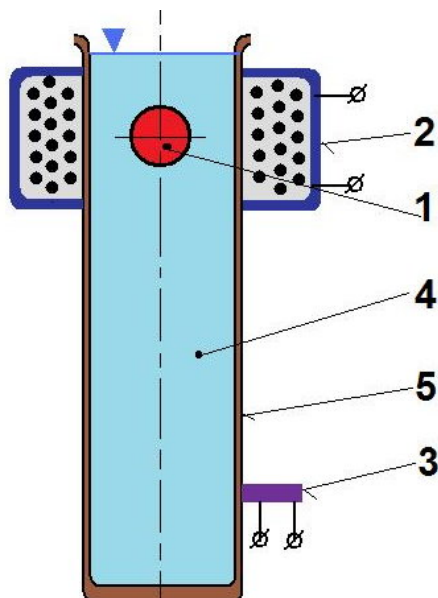
Viskozimetr může měřit dyn. viskozitu až do velikosti $4 \cdot 10^3$ Pa.s, nebo tokové charakteristika neneutonských kapalin, změna gradientu rychlosti se dosahuje různě velkým závažím.

Jiné provedení tlačného viskozimetru, kde kulička je nahrazena válečkem je na obr. 8.6.



Obr. 8.6 Viskozimetr s tlačným válečkem
A – zjednodušený řez, B - pohled

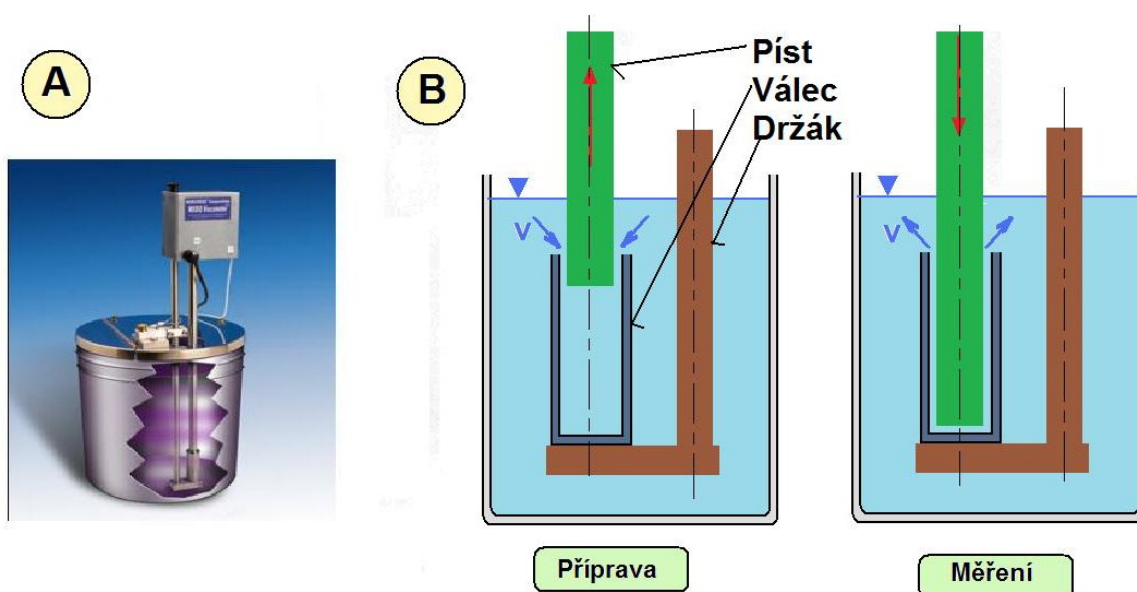
Viskozimetr s elektromagneticky ovládanou kuličkou – obr. 8.7 se skládá z trubice (nádoby) naplněné měřenou kapalinou. V horní části je trubice opatřena elektromagnetem, po jeho zapnutí se feromagnetická kulička ze dna nádoby zvedne nahoru. Když se magnet vypne, kulička se začne pohybovat dolů. Měří se čas, za který kulička projde definovanou dráhu, při čemž poloha kuličky před dosednutím na dno je změřena pomocí magnetického snímače. Měřítkem viskozity je naměřený čas pádu kuličky – rov. (8.7).



Obr. 8.7 Viskozimetr s elektromagneticky ovládanou kuličkou – [18]

1 – feromagnetická kulička, 2 – elektromagnet, 3 – magnetický snímač,
4 – měřicí kapalina, 5 – nádoba s měřenou kapalinou

Tělískový – pístový viskozimetr podle Norcross – obr. 8.8. Viskozimetr sestává z válce naplněného měřenou kapalinou. Do válce se vlastní tíhou zasouvá píst, kapalina z prostoru válce odtéká mezikružím. Když se píst dostane do spodní polohy, je vhodným mechanismem zvednut a celý cyklus se znovu může opakovat. Měřítkem viskozity je doba pádu pístu z horní polohy do spodní.

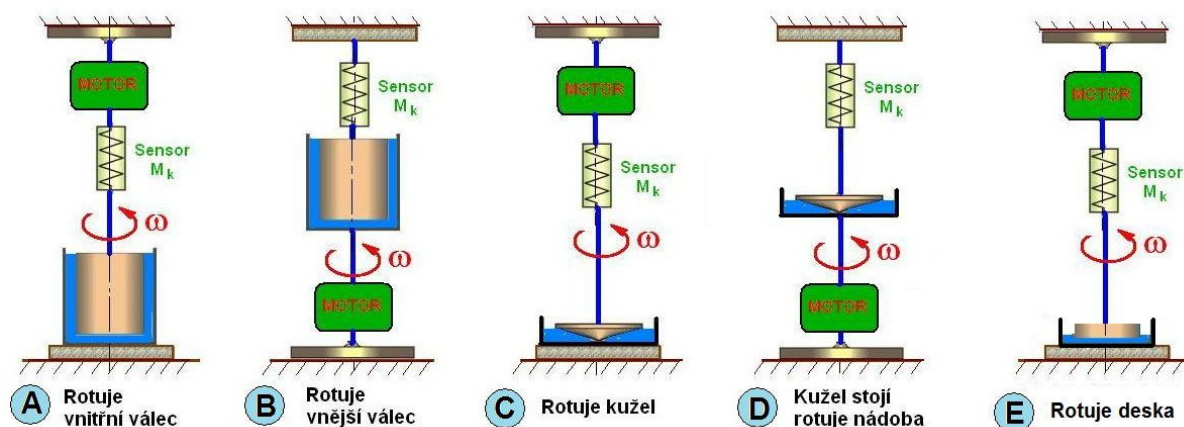


Obr. 8.8 Tělískový – pístový viskozimetr podle Norcross – [19]

A – foto viskozimetru, B – schéma viskozimetru

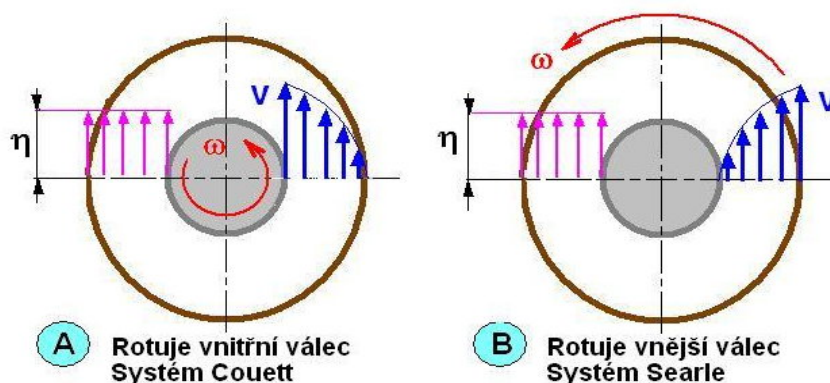
9. Rotační viskozimetr

Přiblížení k pomyslnému pokusu o stanovení viskozity mezi dvěma nekonečnými rovnoběžnými plochami se dá dosáhnout přechodem na soustavu dvou souosých válců, otáčejících se navzájem kolem společné osy. Na tomto principu jsou založeny rotační viskozimetry. Přímě měřitelnými veličinami u rotačních viskozimetrů je úhlová rychlost ω nebo počet otáček za čas ustáleného pohybu jednoho z válců a dále údaje o odporu kapaliny proti smykovému namáhání v důsledku vzniku gradientu rychlosti. Tento odpor se projevuje jako krouticí moment, kterým se jeden z válců přístroje brání proti pohybu přenášeného kapalinou z druhého válce. Rotační viskozimetry se nejčastěji používají ve třech provedeních a sice dva souosé válce nebo kužel – deska, nebo dvě rotující desky - obr. 9.1.



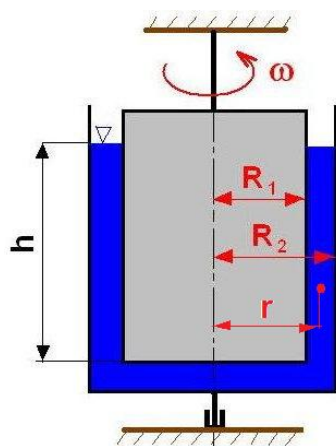
Obr. 9.1 Schematické znázornění rotačních viskozimetrů

Rotační viskozimetr- souosé válce - u systému s rotujícím souosým válcem mohou nastat dva případy a sice, že se otáčí vnitřní válec, potom se jedná o Couettovo proudění – obr. 9.2A, nebo rotuje vnější válec a jedná se o systém Searle – obr. 9.2B. V podstatě nezáleží u těchto viskozimetrů na tom, který z obou válců se otáčí, neboť pro vlastní výpočet stačí uvažovat jen relativní rychlost obou válců. Na základě praktických zkušeností je obvykle doporučováno uspořádání s otáčivým vnitřním válcem.

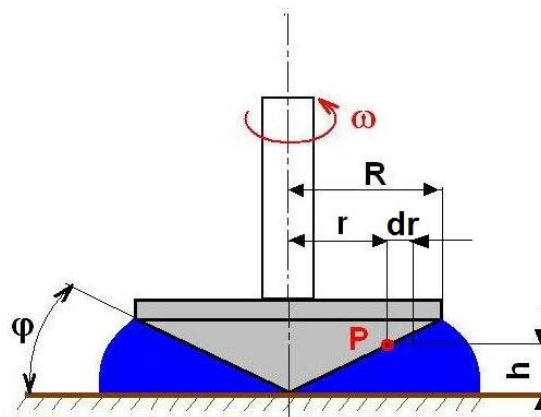


Obr. 9.2 Rychlostní profil mezi rotujícími válci

V současné době existuje celá řada různých konstrukcí rotačních viskozimetrů, které se hlavně liší provedením pohonu otáčejícího se válce a způsobem měření kroutícího momentu. Na obr. 9.3 je uvedeno schéma rotačního viskozimetru s označením potřebných veličin. Převod základních dat, tj. kroutícího momentu M , úhlové rychlosti ω nebo otáček „ n “ na základní veličiny, tj. smykové napětí τ a rychlost smykové deformace j_s je obtížnější než u viskozimetrů kapilárních



Obr. 9.3 Schéma rotačního viskozimetru



Obr. 9.4 Viskozimetr kužel - deska

Při odvození rovnice rotačního viskozimetru vyjdeme z obr. 9.3, definujme poměr poloměrů vnějšího a vnitřního válce

$$\delta = \frac{R_2}{R_1}, \text{ tento poměr se volí v intervalu } 1 \leq \delta \leq 1,1.$$

Pro krouticí moment na obecném poloměru platí

$$M = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \tau. \quad (9.1)$$

Smykové napětí je určeno Newtonovým vztahem

$$\tau = \eta \frac{r \cdot d\omega}{dr} \Rightarrow j = \frac{r \cdot d\omega}{dr},$$

kde $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$, pro otáčky $n = 1/\text{min}$. $\omega = \frac{\pi \cdot n}{30}$.

Z rovnice (9.1) určíme velikost smykového napětí na obecném poloměru „r“ a na stěnách obou válců

$$\tau = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot r^2}; \quad \tau_1 = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot R_1^2}; \quad \tau_2 = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot R_2^2}.$$

Z prvních dvou rovnic vypočítáme přírůstek obvodové rychlosti

$$d\omega = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \eta} \frac{dr}{r^3},$$

odkud po integraci přes celou mezeru mezi válci dostaneme

$$\omega = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \eta} \int_{R_2}^{R_1} \frac{dr}{r^3} = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \eta} \left[\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right] = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \eta} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2 \cdot R_2^2}. \quad (9.2)$$

Z této rovnice můžeme vypočítat velikost krouticího momentu

$$M = 2 \cdot \pi \cdot h \cdot \eta \cdot \omega \cdot \frac{R_1^2 \cdot R_2^2}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (9.3)$$

nebo velikost dynamické viskozity

$$\eta = \frac{M}{2\pi \cdot h \cdot \omega} \left[\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right]. \quad (9.4)$$

Pro gradient rychlosti na obecném poloměru i na stěně vnitřního válce z předcházejících rovnic se odvodí vztahy

$$j = 2 \cdot \omega \frac{R_1^2}{r} \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} = \frac{R_1^2}{r} \left(\frac{\pi}{15} \frac{\delta^2}{\delta^2 - 1} \right) \cdot n$$

$$j_1 = 2 \cdot \omega \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} = \left(\frac{\pi}{15} \frac{R_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \right) \cdot n = \left(\frac{\pi}{15} \frac{\delta^2}{\delta^2 - 1} \right) \cdot n$$

Kde n – otáčky 1/min.

Při laminárním proudění v mezeře mezi dvěma rotujícími válci mohou vzniknout Teylorovy víry, tyto by mohly narušit měření viskozity. Pro dva rotující válce lze definovat Reynoldsovo a Taylorovo číslo

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot R_2 (R_2 - R_1)}{\nu}; \quad T = \frac{\omega \cdot R_2 (R_2 - R_1)}{\nu} \sqrt{\frac{R_2 - R_1}{R_1}} = \text{Re} \cdot \sqrt{\frac{R_2 - R_1}{R_1}}.$$

Kritické Taylorovo číslo podle experimentů je $T_{kr} = 41,3$, aby se vytvořily Taylorovy víry musí mít Reynoldsovo velikost

$$\text{Re} \geq 41,3 \sqrt{\frac{R_1}{R_2 - R_1}},$$

Pro rotační viskozimetr s poloměrem válců $R_1 = 1 \text{ cm}$ a $R_2 = 2 \text{ cm}$ při otáčkách vnitřního válce $n = 300 \text{ 1/min.}$ je min. viskozita $\nu = 0,005 \text{ cSt}$. S tak malou viskozitou se u rotačních viskozimetrů obvykle nepracuje.

Pro newtonskou kapalinu definovanou mocninovou rovnicí toku je smykové napětí určeno vztahem

$$\tau = K \cdot j^n = K \left(\frac{r \cdot d\omega}{dr} \right)^n. \quad (9.5)$$

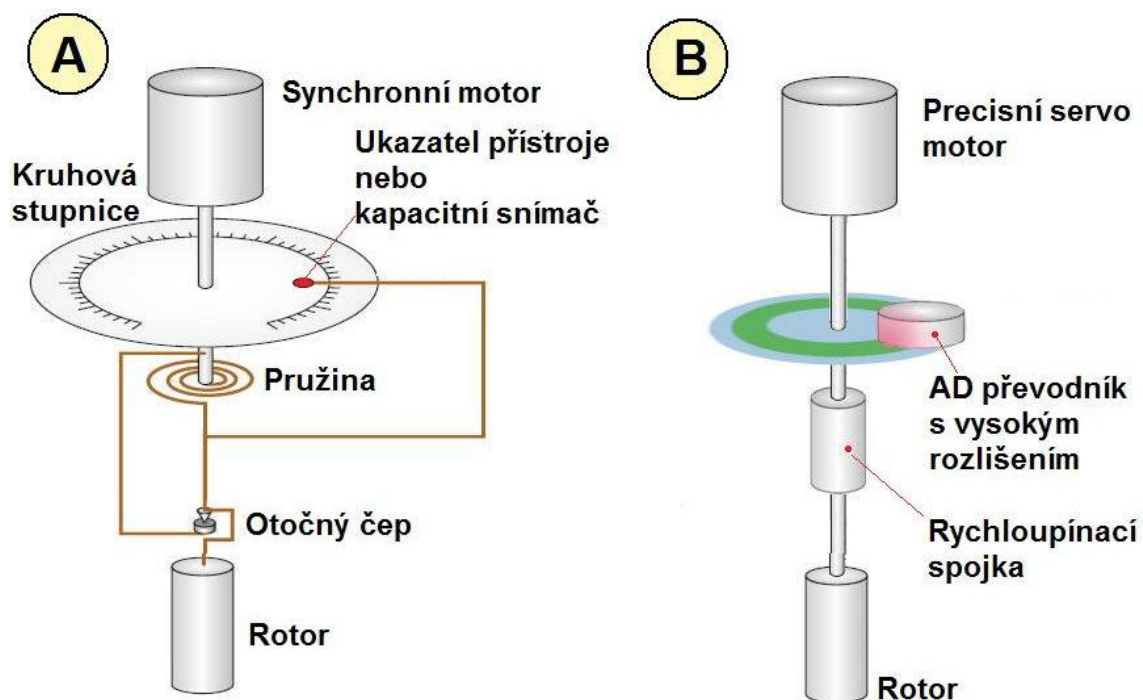
Z rovnice (9.1) a (9.5) pro přírůstek úhlové rychlosti odvodíme

$$d\omega = \left[\frac{M}{2\pi \cdot h \cdot \eta} \right]^{\frac{1}{n}} \frac{dr}{r},$$

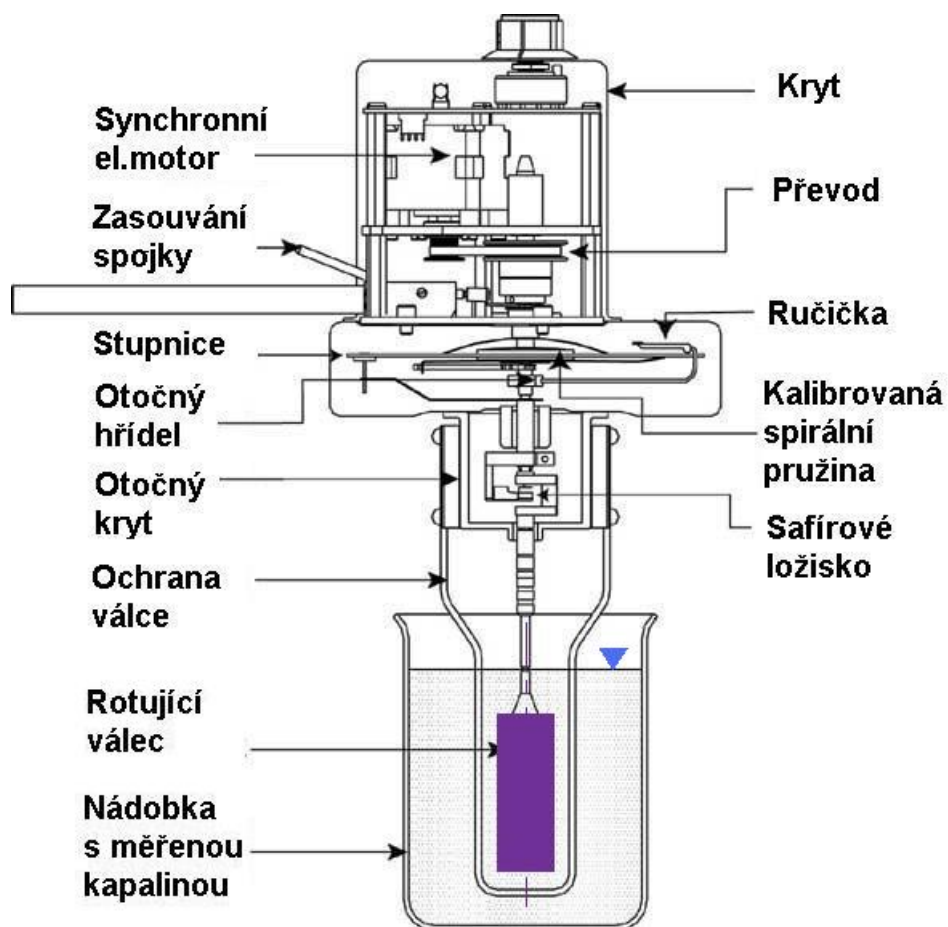
odkud po integraci a malé úpravě pro úhlovou rychlost dostaneme

$$\omega = \frac{n}{2} \left[\frac{M}{2\pi \cdot h \cdot \eta} \right]^{\frac{1}{n}} \left[\left(\frac{1}{R_1^2} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{1}{R_2^2} \right)^{\frac{1}{n}} \right] = \frac{n M^{\frac{1}{n}}}{2 K^{\frac{1}{n}} (2\pi h)^{\frac{1}{n}}} \left[\left(\frac{1}{R_1^2} \right)^{\frac{1}{n}} - \left(\frac{1}{R_2^2} \right)^{\frac{1}{n}} \right]. \quad (9.6)$$

Logaritmováním přejde rovnice (9.6) v souřadnicích $\omega=f(M)$ v přímku, jejíž směrnice je index toku n a z úseku na ose pořadnic pro $M = 1$ určíme hodnotu K . Této skutečnosti se využívá při vyhodnocování součinitele konzistence K a indexu toku „n“ z naměřených hodnot na rotačním viskozimetru



Obr. 9.5 Schéma měření krouťícího momentu u rotačního viskozimetru
 A – měřicí systém s pružinou, B – měření krouť. momentu ADpřevodníkem

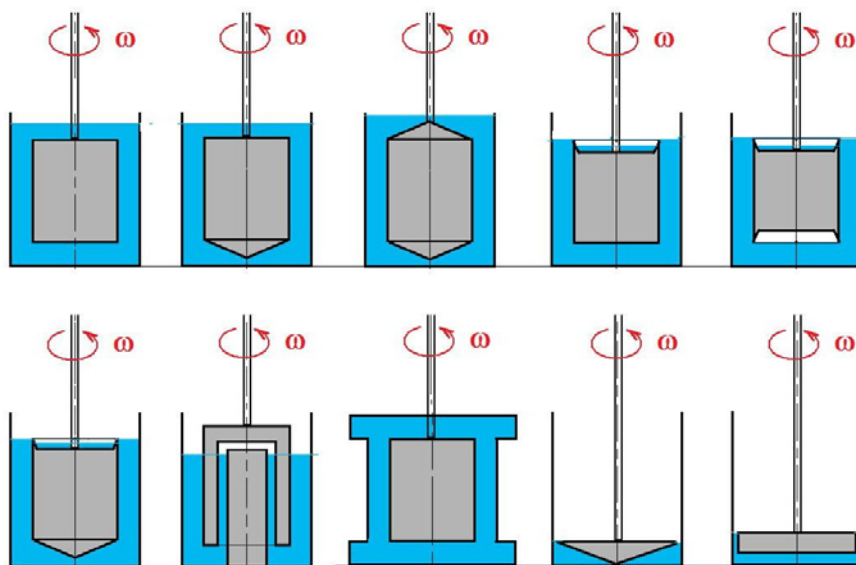


Obr. 9.6 Řez rotačním viskozimetrem

Na obr. 9.5 je uvedeno zjednodušené měření a snímání velikosti krouticího momentu, u přístrojů s manuálním odečítáním M_k je měřícím elementem pružina – obr. 9.5A. Pro viskozimetry, kde je vyhodnocování naměřené viskozity provedeno pomocí PC musí být viskozimetr opatřen snímačem a AD převodníkem měřeného M_k – obr. 9.5B.

Konstrukční řešení rotačních viskozimetrů je velmi rozmanité, obr. 9.6 uvádí řez viskozimetrem, u kterého je pro měření M_k použita kalibrovaná pružina.

Při odvození rovnice (9.2) až (9.4) pro rotační viskozimetr se sousými válci bylo předpokládáno, že třecí síla působí pouze na válcové plochy statoru nebo rotoru a že nepůsobí žádné koncové efekty, vyvolané především třením o dno nebo víko některého ze dvou válců. Těmto vlivům se u skutečných viskozimetrů nedá zabránit, takže naměřený krouticí moment je z části způsobován i působením řady dalších obvykle těžko definovaných třecích sil. Pro snížení těchto tzv. koncových efektů bylo navrženo několik empirických metod a rovněž byly navrženy různé konstrukční úpravy válců – obr. 9.7. Nejčastěji se pro kompenzaci koncových vlivů používá určení „ekvivalentní výšky“ válce, která se zjišťuje



Obr. 9.7 Některé úpravy měrného prostoru rotačních viskozimetrů

kalibračním měřením s newtonskou kapalinou známé viskozity, takové kapaliny jsou dnes běžně dostupné. Tuto opravenou výšku je potom třeba dosadit do rovnice (9.4), ze které se počítá dynamická viskozita.

Další okolností, která může mít značný vliv na přesnost měření viskozity je vzestup teploty měřeného vzorku kapaliny po dobu měření, který se projeví poklesem krouticího momentu v průběhu měření. Tento vliv, který roste se zvětšováním otáček se z části dá odstranit dokonalým chlazením vzorku. Chlazení nebývá obvykle při vysokých otáčkách a vysoké viskozitě dostatečné, protože se jedná o laminární proudění u kterého součinitel přestupu tepla je malý. Eliminace vlivu ohřevu vzorku je možné provádět rovněž početně. Pokud se rotující válec rozkmitá (tzv. dynamické měření) potom je možné měřit elasticitu látky.

Viskozimetr typu kužel-deska je velmi vhodný přístroj pro měření viskozity nenewtonovských kapalin, hlavně pro jednoduchost výpočtových rovnic (konstantní gradient rychlosti v mezeře). Může být v provedení, že rotuje kužel – obr. 8.1C proti stojící desce, nebo kužel stojí a rotuje deska s měřenou kapalinou – obr. 8.1D. Schéma tohoto přístroje je na obr. 9.4. Na otáčení kužele proti stojící desce úhlovou rychlostí ω je zapotřebí určitý krouticí moment, jehož velikost stejně jako u viskozimetrů se sousými válci je měřítkem velikosti viskozity měřené kapaliny.

Rychlost smykové deformace lze odvodit následující úvahou: v libovolně zvoleném bodě P na poloměru r je rychlost $r\omega$, přičemž jeho vzdálenost od nepohyblivé desky je $h=r.tg\varphi$. Podle obr. 9.4 je velikost rychlosti smykové deformace určena vztahem

$$j = \frac{r \cdot \omega}{h} = \frac{\omega}{\tan \varphi} = \frac{\omega}{\varphi},$$

pro φ v radiánech. Z této rovnice je vidět, že gradient rychlosti pro malé úhly φ prakticky nezávisí na poloměru „ r “, a je tudíž rovnoměrný v celém vzorku. S použitím této rovnice pro smykové napětí dostaneme

$$\tau = \eta \cdot j = \eta \frac{\omega}{\tan \varphi} = \eta \frac{\omega}{\varphi}. \quad (9.7)$$

Pro krouticí moment na libovolném poloměru platí

$$dM = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot \tau \cdot dr.$$

Po integraci a malé úpravě pro dynamickou viskozitu dostaneme

$$\eta = \frac{3M \cdot \varphi}{2 \cdot \pi \cdot R^3 \cdot \omega}, \quad (9.8)$$

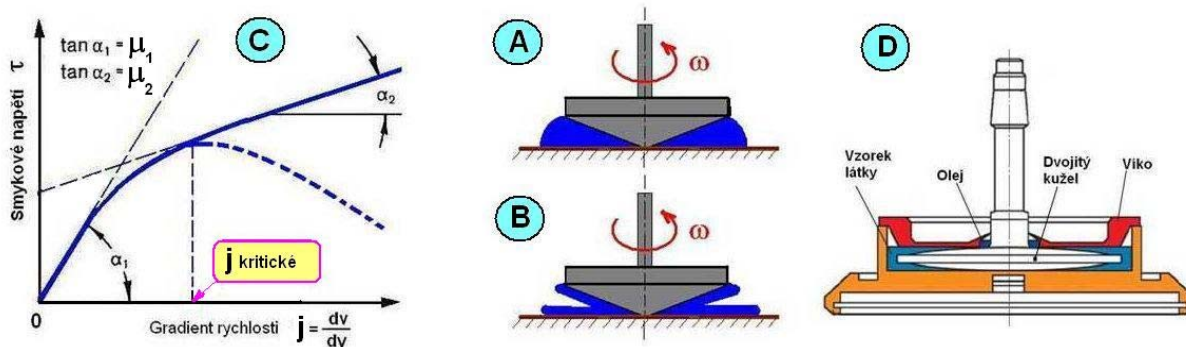
odkud s použitím rovnice (9.6) pro smykové napětí platí

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3}. \quad (9.9)$$

Rychlost smykové deformace lze odvodit následující úvahou : v libovolně zvoleném bodě P na poloměru r je rychlost $r \cdot \omega$, přičemž jeho vzdálenost od nepohyblivé desky je $h = r \cdot \tan \varphi$. Gradient rychlosti je tedy v prvním přiblížení

$$j_s = \frac{r \omega}{h} = \frac{\omega}{\tan \varphi} = \frac{\omega}{\varphi}, \quad (9.10)$$

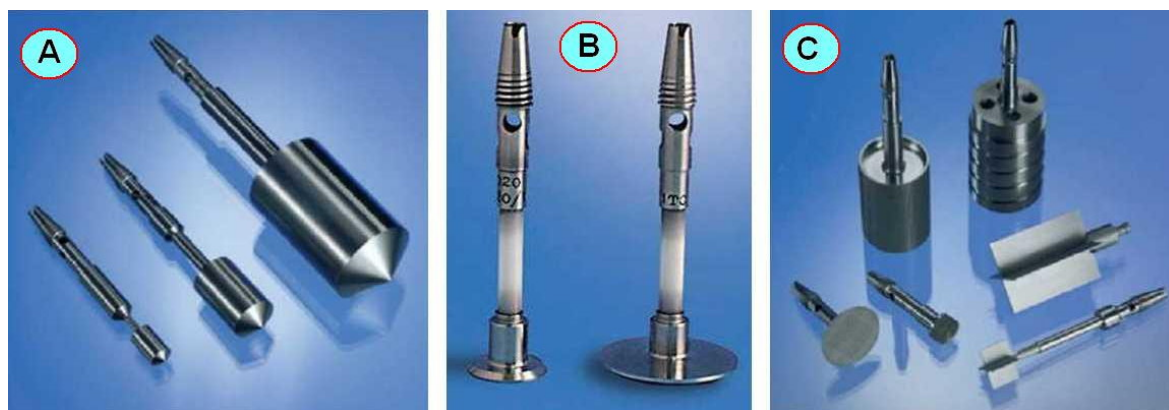
pro φ v radiánech. Jak vyplývá z této rovnice, je gradient rychlosti rovnoměrný v celém vzorku. Rovnice (9.9) a (9.10) platí s dostatečnou přesností i pro neneutronovské kapaliny a jednoduchost těchto rovnic je hlavním důvodem použití tohoto typu viskozimetru.



Obr. 9.8 Viskozimetr kužel – deska - [2]

Viskozimetr kužel deska má z hlediska velikosti otáček určité omezení – obr. 9.8, poněvadž kapalina za jistých kritických otáček se dostane do stavu dle obr. 9.8B a měřená velikost viskozity podle obr. 9.8C pak neodpovídá skutečnosti. Viskozimetr kužel deska se také provádí s oboustranným kuželem - obr. 9.8D.

Na obr. 9.9A je uvedeno jedno z možných provedení rotujících válců, obr. 9.9B uvádí rotující disk a kužel, který se rovněž pro měření viskozity používá, obr. 9.9C uvádí vnitřní válec, který má na povrchu vytvořenou spirálu, toto provedení se používá při měření viskozity suspenzí. Na obr. 9.9C jsou uvedeny i jiné elementy, které se u rotačních viskozimetrů pro měření viskozity používají.

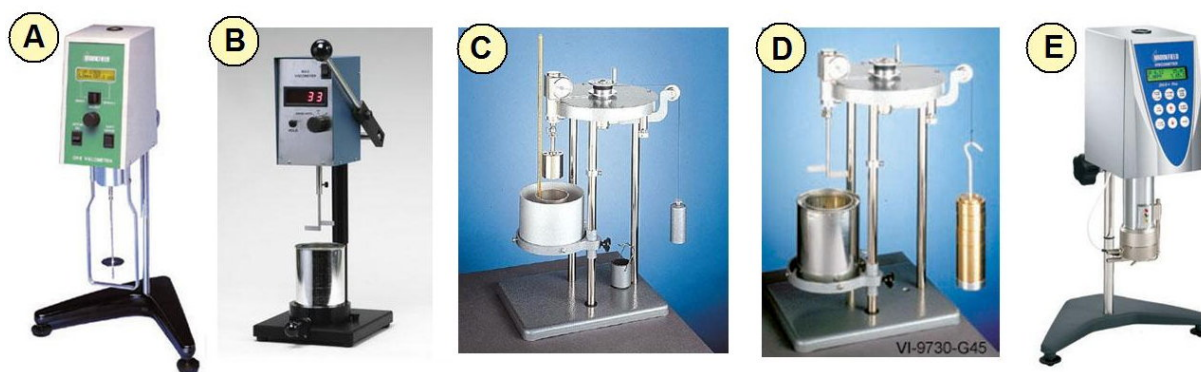


Obr. 9.9 Ukázka válců a kuželů rotačních viskozimetrů - [11]



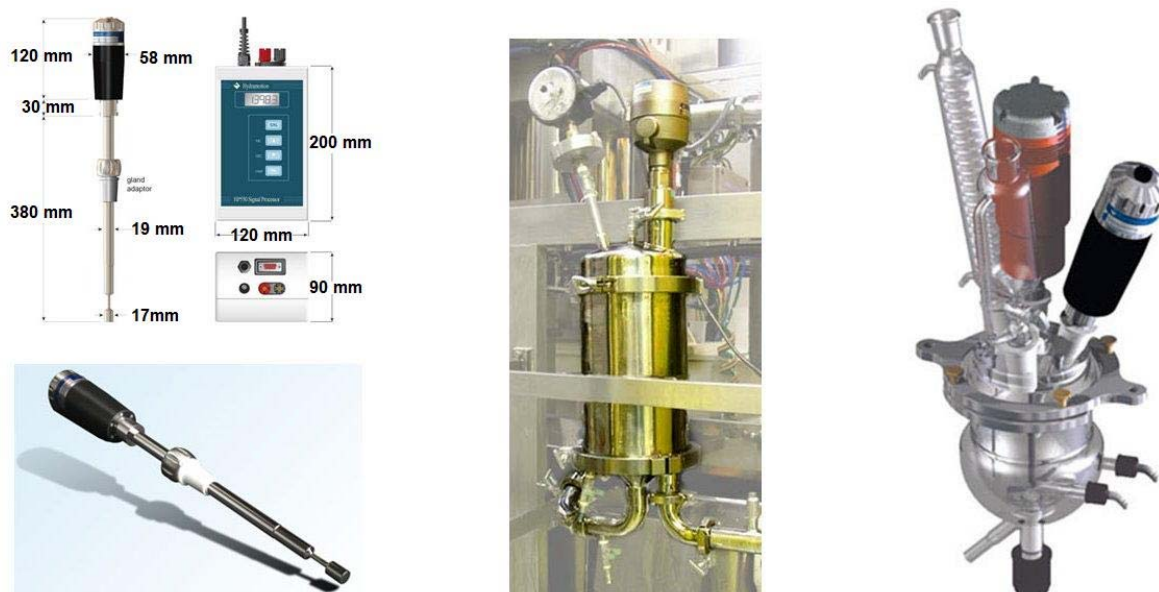
Obr. 9.10 Ukázka dvou rotačních viskozimetrů - [11]

Praktické provedení rotačních viskozimetrů od dvou různých výrobců je na obr. 9.10 a obr. 9.11, ke standardnímu vybavení patří sada válců nebo kuželů s různou geometrií, viskozimetry jsou vybaveny zařízením pro ohřev vzorku, zpracování naměřených výsledků zajišťuje PC.



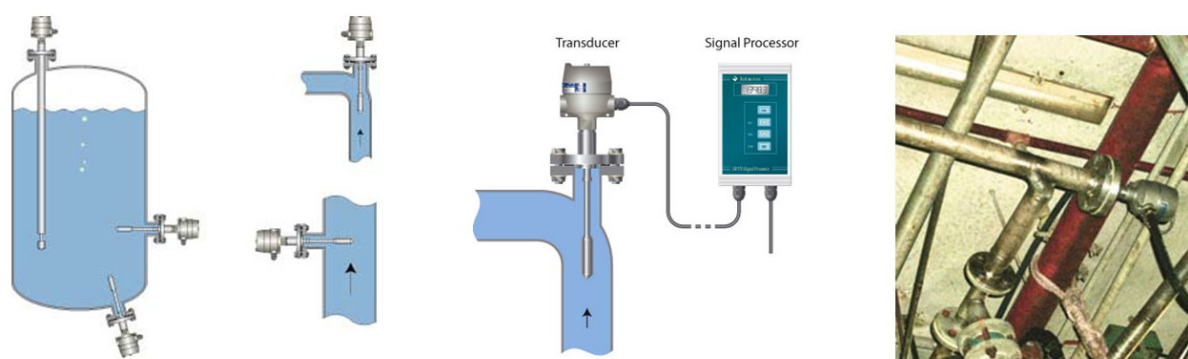
Obr. 9.11 Ukázka rotačních viskozimetrů - [5], [7]
 A – viskozimetr s rotujícím diskem, B, D – viskozimetr s rotující deštičkou,
 C – viskozimetr s rotujícím vnitřním válcem, E – viskozimetr kužel-deska

V laboratořích nebo v poloprovozních podmínkách je často vyžadováno měření viskozity a to v některých případech i měření kontinuální. Rotační viskozimetry se pro tyto aplikace velmi často používají, ukázku uvádí obr. 9.12.



Obr. 9.12 Použití rotačních viskozimetrů pro kontinuální měření viskozity v laboratorních nebo poloprovozních zařízeních - [10]

V mnoha průmyslových zařízeních, jako je průmysl chemický, potravinářský, petrochemický, při výrobě piva, při aplikaci rozmrazovací emulze na letištích je zapotřebí kontinuální měření viskozity, toto si vyžaduje použitá technologie. Pro taková měření se ukazuje jako velmi výhodný rotační viskozimetr, jedná se obvykle o měření v nádržích nebo v potrubí a to při různých teplotách i tlacích – obr. 9.13 a obr. 9.14.



Instalace do zásobníku

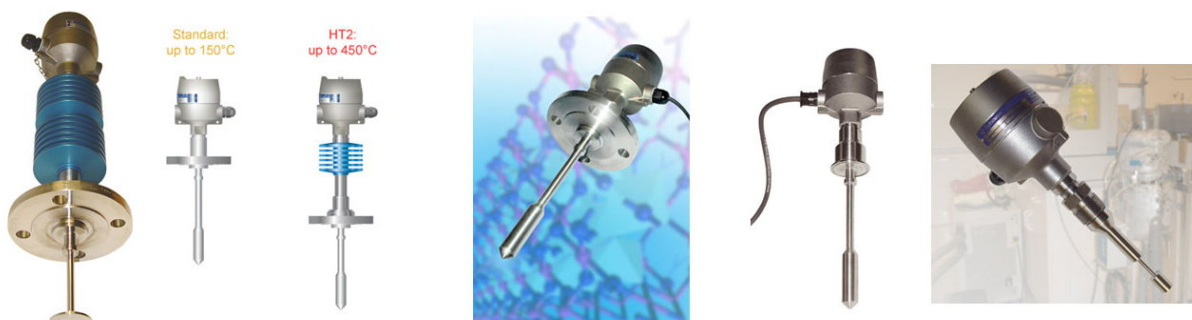
Instalace do potrubí

Obr. 9.13 Montáž rotačních viskozimetrů pro kontinuální měření viskozity v nádržích nebo v potrubí v průmyslových zařízeních - [10]

Rotační viskozimetr přenosný



Rotační viskozimetr pro průmyslové aplikace



Obr. 9.14 Rotační viskozimetry přenosné – ruční a viskozimetry pro kontinuální průmyslová měření - [10]

Velmi často se vyskytuje potřeba provádět ruční měření viskozity, i tyto podmínky dobře splňuje rotační viskozimetr, ukázkou uvádí obr. 9.15, přenosné viskozimetry se dají napojit na PC.



Obr. 9.15 Ukázky měření viskozity přenosným rotačním viskozimetrem - [10]

10. Vibrační viskozimetr

Princip vibračních viskozimetrů vychází z tlumeného kmitání tělesa ve vazké tekutině, to je v případě nevynuceného kmitání popsáno rovnicí

$$\ddot{y} + 2.b.\dot{y} + \omega_o.y = 0, \quad (10.1)$$

podobná rovnice platí i pro vynucené tlumené kmitání

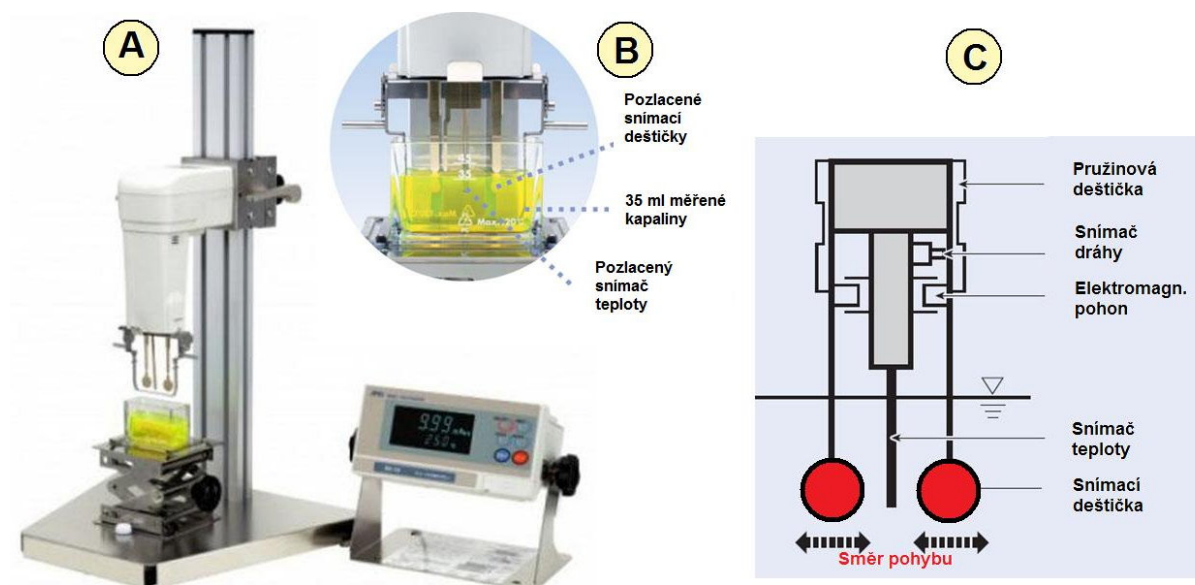
$$\ddot{y} + 2.b.\dot{y} + \omega_o.y = \frac{F}{m} \sin \omega.t. \quad (10.2)$$

V obou těchto rovnicích je „b“ součinitel tlumení, při laminárním proudění je součinitel tlumení lineární funkcí kinematické viskozity $b \approx k \cdot \nu$. Pro laminární proudění v trubici kruhového průřezu pro součinitel tlumení je možné odvodit rovnici

$$b = \frac{16 \cdot \nu}{d^2} \quad (10.3)$$

U vibračního viskozimetru se pohybuje vhodné tělísko, jeho pohyb může být torzní nebo příčný jako u ladičky. Jsou možné prakticky tři způsoby měření: měří se příkon pro oscilace s konst. amplitudou a konst. frekvencí; měří se doba útlumu po vypnutí přístroje; měří se rezonanční frekvence.

Vibrační viskozimetry využívají k měření viskozity útlumu kmitajícího tělesa v kapalině, tvar tělesa může být nejrůznější geometrie jako např., deska, válec, kruhový terč apod. Když u klasického rotačního viskozimetru necháme vnitřní válec konat torzní kmity uvnitř stojícího vnějšího válce, při čemž vhodně upravíme velikost momentu setrvačnosti získáme torzní viskozimetr, viskozitu stanovíme měřením útlumu kmitajícího válce- [5], [9].



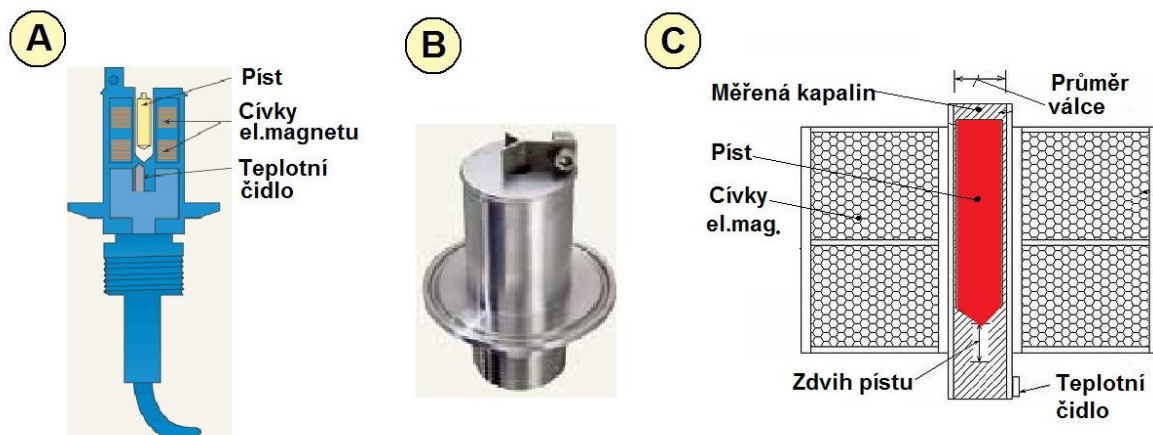
Obr. 10.1 Vibrační viskozimetr - [5], [9]
A – měřicí přístroj, B – měřicí nádoba, C – vibrační deštičky

Vibrační viskozimetr založený na měření útlumu kmitajících dvou tenkých kruhových terčů uvádí obr. 10.1. Tato metoda umožňuje vysokou přesnost a široký rozsah měření bez nutnosti výměny snímacích částí přístroje. Viskozita je měřena nepřímo měřením velikosti sinusového budícího elektrického proudu potřebného pro rezonanci dvou kruhových terčů při konstantní frekvenci 30 Hz a amplitudě nižší než 1 mm. Měření probíhá v reálném čase, současně je měřena i teplota vzorku kapaliny s přesností 0,1°C. Přístroj se musí cejchovat kapalinou známé viskozity, postačí jednobodová nebo dvoubodová kalibrace. Přístroj je vhodný i pro měření neneutonských kapalin, pěnových a pěnivých vzorků, koloidních roztoků, měření tekoucích vzorků včetně tekutin při turbulentním proudění. Pro měření stačí cca 35 ml vzorku, přístroj má rozhraní pro sběr dat a grafický software pro přenos měřených dat viskozity a teploty do PC a ke grafickému zobrazení změn v reálném čase. Přesnost měření nepřekračuje 1%, přístroj je schopen měřit viskozitu až do velikosti 100 Pa.s

Vibrační viskozimetr CAMBRIGE – obr. 10.2 - [13]. Viskozimetr sestává z elektromagnetu, u kterého se střídavě zapíná horní a dolní cívka. V prostoru magnetu je měřená kapalina, ve které se nachází píst (plovák), tento je elektromagnetem pohybován konstantní silou střídavě nahoru a dolů. Měřítkem viskozity je rychlost pohybu pístu. Oscilační pohyb pístu umožňuje měření viskozity v širokém rozsahu viskozit – 0,2 až 20 000

cP, měřená kapalina může být průhledná, průsvitná i neprůhledná. Viskozimetr se může používat pro laboratorní i provozní kontinuální měření, vzorek měřené kapaliny je malý, několik cm^3 i méně. Měření se může realizovat pro teplotu od -30°C až 190°C a pro tlak desítky MPa. Měřená kapalina při kontinuálním měření se může v měřicím prostoru neustále vyměňovat, tomu napomáhá deflektor na snímači, měření probíhá v automatickém režimu, viskozimetr se vyznačuje vysokou přesností a opakovatelností měření.

Měření je testováno podle americké společnosti pro testování materiálů – ASTM D 7483-08 a přímo koreluje s ASTM D 445. Při měření viskozity je současně snímána teplota vzorku, tím je umožněno provádět korekci viskozity při měnění se teplotě, toto velmi přispívá k přesnosti měření viskozity. Viskozimetr je vyráběn v mnoha variantách a je tedy schopen pokrýt široký rozsah možných aplikací a to jak v laboratořích tak i při provozních měřeních.



Obr. 10.2 Vibrační viskozimetr Cambridge - [13]
A – řez viskozimetrem, B – foto snímače, C – řez elektromagnetem

11. Výtokové kelímky

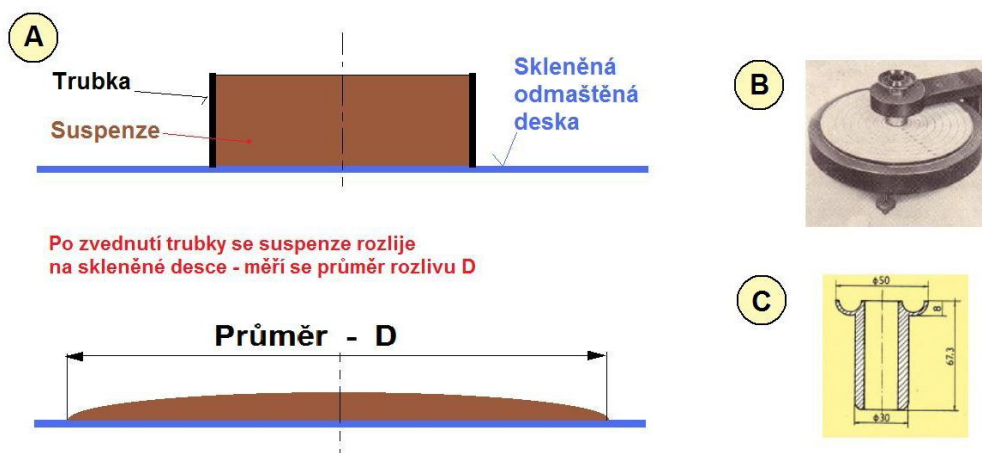
Pro relativní měření viskozity se používají výtokové kelímky, tvar kelímků je dán normou DIN nebo ISO, kelímky jsou rovněž vyráběny různými výrobci podle jejich vlastních návrhů. Materiálové provedení je rozmanité, mohou to být plasty, barevné kovy a nerezová ocel. Měřítkem velikosti viskozity je čas potřebný na vyprázdnění celého obsahu kelímku, který byl před měřením naplněn zkoumanou kapalinou, Takto naměřená viskozita je pouze viskozitou relativní, protože je udávána v sekundách. Nejčtenější použití viskozity je při přípravě barev před jejich stříkáním nebo nanášením na natírané povrchy. Několik příkladů výtokových kelímků uvádí obr. 11.1. Postup měření může být proveden např. podle normy ČSN EN ISO 2431, tato norma je českou verzí normy EN ISO 2431



Obr. 11.1 Výtokové kelímky - [7]

12. Měření relativní viskozity – konzistence rozlivem

Pro neneutonské kapaliny, u kterých se nedá měřit reogram, nebo měření je obtížné či časově náročné (např. suspenze), lze relativní viskozitu – konzistenci změřit rozlivem. Měření se provádí tak, že se konstantní množství měřené látky o známé teplotě naplní do válcové nádoby bez dna, tato se postaví na hladkou a dobře odmaštěnou skleněnou desku. Nádoba se po naplnění zvedne, měřená látka se na skleněné desce rozlije, měřítkem konsistence je průměr obrazce rozlivu, může se také sledovat i čas rozlivu. Tento způsob měření se uplatňuje u barev a hlavně u koncentrovaných suspenzí.



Obr. 12.1 Měření relativní viskozity – konzistence rozlivem

A – zařízení pro suspenzi

B – přípravek pro rozliv barev, C- kelímek pro rozliv barev

13. Viskozita olejů

V průmyslových aplikacích se používají maziva s nejrozmanitějšími vlastnostmi, jejich možná rozdělení je následující - [12] :

Maziva pro motorová vozidla

- motorové oleje pro osobní vozidla
- oleje pro užitková vozidla
- olej pro zemědělské stroje
- kapaliny pro automatické převodovky
- automobilové převodové oleje
- motocyklové oleje

Průmyslová maziva

- válcové oleje
- oleje pro kluzné plochy a vřetena
- turbinové a oběhové oleje
- hydraulické oleje
- průmyslové převodové oleje
- oleje pro chladicí zařízení
- kompresorové oleje
- olej pro pneumatická nářadí
- elektroizolační oleje
- oleje pro plynové motory
- teplotnosné oleje
- řezné kapaliny - řezné oleje
- speciální produkty
- konzervační oleje
- maziva pro potravinářský průmysl
- plastická maziva
- mazání otevřených převodů - plastická maziva
- bílé oleje
- oleje pro textilní stroje
- procesní oleje
- ekologické oleje
- kalící oleje
- obráběcí oleje
- tvářecí kapaliny
- válcovací kapaliny

Viskozitní klasifikace - většina maziv je prodávána pod obchodními názvy, které samy o sobě nic neříkají o vlastnostech a možnostech použití maziva. Pouze u automobilových olejů bývá součástí názvu i viskozitní specifikace. Detailní informace o mazivu je možné získat z produktových listů výrobce. Produktové listy popisují podrobně vlastnosti maziv (např. viskozitu), chemické složení maziv (druh základového oleje, obsah aditiv) a oblasti jejich použití (např. hydraulický olej pro vysokou zátěž). Nejdůležitější informace uvádějí výrobci ve stručnější formě přímo na obalech (viskozita, oblast použití, opatření proti poškození zdraví).

Fyzikální vlastnost viskozita (nezaměňovat s hustotou!) je jednou ze základních vlastností, kterou je třeba zvážit při výběru vhodného maziva. Viskozita je veličina udávající velikost vnitřního tření v kapalině. Nízko viskózní kapaliny jsou snadno tekuté (např. voda), vysoce viskózní kapaliny tečou obtížně (např. med). Viskozita maziva má zásadní vliv na kvalitu mazání. Pokud je viskozita příliš nízká (vysoká tekutost), mazivo je vytlačováno z mazacího prostoru, dochází ke ztenčení olejového filmu, což způsobí nedostatečné mazání a může dojít k poškození mazaných ploch. Pokud je viskozita maziva příliš vysoká (nízká tekutost), mazivo se obtížně dostává do mazacího prostoru a na mazaná místa což způsobí

nedostatečné mazání a může dojít k poškození mazaných ploch. Navíc viskózní mazivo způsobuje velké pasivní odpory třecích ploch a tím ekonomické ztráty.

Viskozita olejů se mění se změnou teploty a se stářím oleje (s vyšší teplotou viskozita klesá). Proto se předepsaná viskozita oleje nestanovuje jako konkrétní hodnota, ale jako rozmezí hodnot, ve kterých se může viskozita pohybovat. Tato rozmezí se označují pojmem Viskózní třídy a jejich označení a vlastnosti jsou normovány. Viskózní třídy olejů pro motorová vozidla jsou definovány normou SAE J300 (SAE - Society of Automotive Engineers), viskózní třídy pro průmyslové oleje normou ISO VG (ISO - International Organization for Standardization - Viscosity Grade).

Motorové oleje - je technologicky velmi složitý výrobek, jehož vlastnosti jsou klasifikovány řadou technických parametrů. Pro výběr optimálního motorového oleje z hlediska konečného uživatele jsou důležité především tyto dva základní specifikace: Viskózní a výkonová.

Viskozita (neboli míra vnitřního tření) mazacího oleje není konstantní veličina, ale závisí na okolních podmínkách. Během činnosti motoru dochází ke změnám teploty a tlaku a je žádoucí, aby se viskozita oleje za těchto podmínek měnila co nejméně. Závislost viskozity oleje na teplotě je vyjádřena tzv. **viskózním indexem (VI)**. Čím vyšší je hodnota VI, tím méně se mění viskozita při změnách teploty v motoru. Viskózní index se uvádí v katalogích výrobců automobilových maziv. Pro běžné označení viskózních vlastností motorového oleje se používá výhradně **klasifikace SAE** (Society of Automotive Engineers, USA). Tato norma používá pro klasifikaci olejů 6 zimních tříd označených číslem a písmenem "W" (z angl. Winter) a 5 letních tříd označených číslem. Číslo je bezrozměrné a nevyjadřuje vztah k žádné fyzikální veličině. Přesto je jistou analogií k viskozitě. Čím je tedy jeho hodnota vyšší, tím je i takto označený olej za dané teploty viskóznější.

Zimní třídy*: **OW, 5W, 10W, 15W, 20W a 25W**

Letní třídy*: **20, 30, 40, 50 a 60**

*) norma SAE J300

Zimní označení vymezuje tzv. "startovatelnost" motoru při nízkých teplotách. Obecně platí, že čím nižší je číslo zimní třídy, tím nižší může být teplota okolí při zachování tekutosti oleje dostatečné pro snadné spuštění motoru, tzn. olej není příliš viskózní ("hustý"). Oleje OW umožňují bezproblémové startování motoru i při teplotách pod -50° C, oleje 5W při teplotách okolo -40° C atd. (platí pouze orientačně, tento údaj závisí do značné míry také na typu a velikosti motoru).

Letní označení garantuje dostatečnou viskozitu oleje za vysokých letních teplot. Obecně platí, že čím vyšší je číslo letní třídy, tím vyšší může být teplota okolí při zabezpečení dostatečného mazání motoru, tzn. olej není příliš nízkoviskózní, což by zapříčinilo trhání mazacího filmu. V praxi se ukázalo, že pro evropské klimatické podmínky jsou třídy 40, resp. 50 plně dostačující, oleje třídy 60 mohou zapříčinit mírné snížení výkonu motoru.

V současné době se prakticky výhradně používají tzv. vícestupňové ("multigrade") motorové oleje, které umožňují celoroční bezpečné mazání motoru za rozmanitých klimatických podmínek. Označují se kombinací zimní a letní třídy, typické jsou např.: **OW-40, 5W-40** nebo **5W-50, 10W-40 a 15W-40**.

Viskózní třídy olejů pro motorová vozidla jsou klasifikovány normou SAE J300, hodnoty uvádí tabulka 13.1.

Tabulka 13.1 Viskozitní třídy olejů pro motorová vozidla podle klasifikace normou SAE J300

Viskozitní třída SAE	Viskozita ve studeném stavu		Viskozita při 100°C		HTHS 150°C
	max. viskozita [mPa.s]	*hraniční čerpací teplota [°C]	minimální viskozita [mm ² /s]	maximální viskozita [mm ² /s]	minimální viskozita [mPa.s]
0W	6200 při -35°C	-40	3,8	-	-
5W	6600 při -30°C	-35	3,8	-	-
10W	7000 při -25°C	-30	4,1	-	-
15W	7000 při -20°C	-25	5,6	-	-
20W	9500 při -15°C	-20	5,6	-	-
25W	13000 při -10°C	-15	9,3	-	-
20	-	-	5,6	< 9,3	2,6
30	-	-	9,3	< 12,5	2,9
40	-	-	12,5	< 16,3	2,9**
40	-	-	12,5	< 16,3	3,7***
50	-	-	16,3	< 21,9	3,7
60	-	-	21,9	< 26,1	3,7

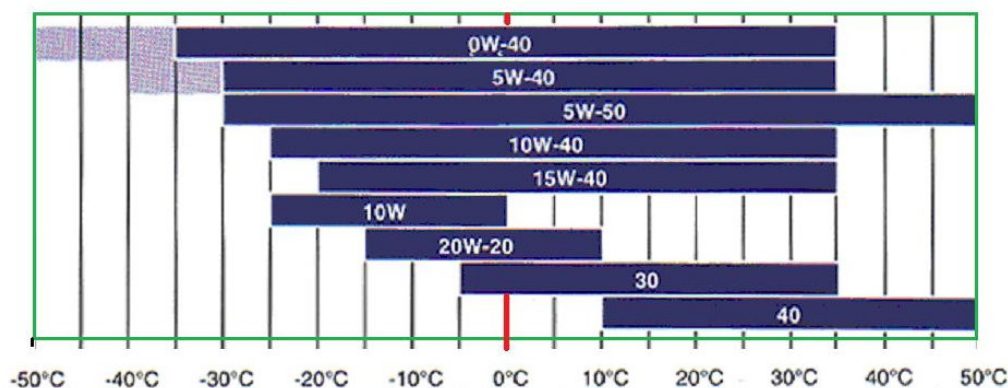
Poznámka: * - teplota, při níž je viskozita 60000 [mPa.s]

** - platí pro 0W40, 5W40, 10W40

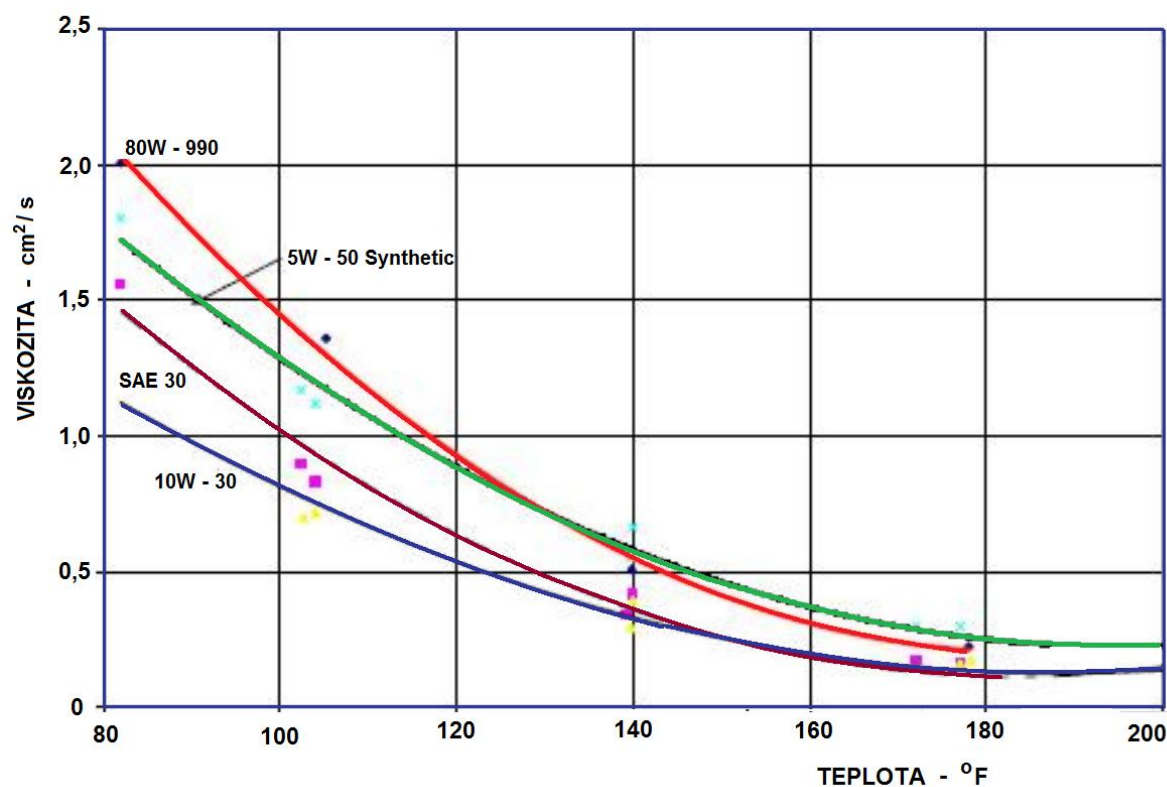
*** - platí pro 15W40, 20W40, 25W40, 40

Čím je číslo viskozitní třídy vyšší, tím je olej více viskózní. U každé viskozitní třídy je definována minimální viskozita při vysoké teplotě 100°C (garance, že olej bude i při vysoké teplotě dostatečně viskózní a udrží se v mazacím prostoru). Písmeno "W" (z anglického Winter) u nižších viskózních tříd upozorňuje na to, že je u viskozitní třídy navíc definována maximální hodnota viskozity při nízkých teplotách (garance, že i při nízkých teplotách mazivo příliš neztuhne). Podle toho, zda viskozita oleje vyhovuje pouze jedné viskózní třídě nebo více třídám, dělíme oleje na jednorozsahové a vícerozsahové. Příkladem jednorozsahového oleje je olej s označením SAE 10W (splňuje nároky pouze jedné viskózní třídy 10W), příkladem vícerozsahového oleje je olej s označením SAE 10W-40 (splňuje nároky viskozitní třídy 10W i viskozitní třídy 40). Viskozitu vybraných motorových olejů v závislosti na teplotě uvádí obr. 13.2.

Doporučené viskozitní třídy SAE motorových olejů podle vnějších teplot (°C) uvádí obr. 13.



Obr. 13.1 Doporučené viskozitní třídy SAE motorových olejů podle vnějších teplot (°C) - [12]



Obr. 13.2 Viskozita vybraných motorových olejů v závislosti na teplotě - [12]

Viskozitní třídy převodových olejů pro motorová vozidla jsou klasifikovány normou SAE J300, hodnoty uvádí tabulka 13.2.

Tabulka 13.2 Viskozitní třídy převodových olejů pro motorová vozidla podle klasifikace normou SAE J300 - [12]

Viskozitní třída SAE	Maximální teplota při 150000 mPa.s	Viskozita při 100 °C [mm²/s]	
	[°C]	minimální	maximální
70W	-55	4,1	-
75W	-40	4,1	-
80W	-26	7,0	-
85W	-12	11,0	-
80	-	7,0	< 11,0
85	-	11,0	< 13,5
90	-	13,5	< 24,0
140	-	24,0	< 41,0
250	-	41,0	-

Čím je číslo viskozitní třídy vyšší, tím je olej více viskózní. U každé viskozitní třídy je definována minimální viskozita při vysoké teplotě 100°C (garance, že olej bude i při vysoké teplotě dostatečně viskózní a udrží se v mazacím prostoru). Písmeno "W" (z anglického Winter) u nižších viskózních tříd upozorňuje na to, že je u viskozitní třídy navíc definována maximální hodnota viskozity při nízkých teplotách (garance, že i při nízkých teplotách mazivo příliš nezuhne). Podle toho, zda viskozita oleje vyhovuje pouze jedné viskózní třídě nebo více třídám, dělíme oleje na jednorozsahové a vícerozsahové. Příkladem jednorozsahového oleje je olej s označením SAE 80W (splňuje nároky pouze jedné viskózní třídy 80W).

Viskózní třídy průmyslových olejů jsou definovány normou ISO VG výsledky uvádí tabulka 13.3

Tabulka 13.3 Viskózní třídy průmyslových olejů podle normy ISO VG - [12]

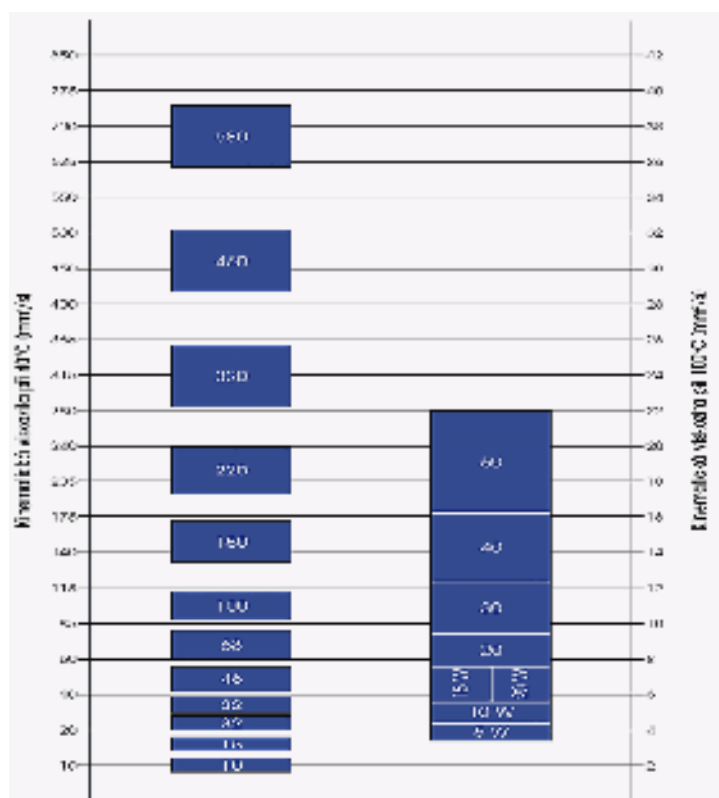
Viskozitní třída	Střední viskozita při 40 °C [mm ² /s]	Viskozitní rozpětí při 40 °C [mm ² /s]
ISO VG 2	2,2	1,98 - 2,42
ISO VG 3	3,2	2,88 - 3,52
ISO VG 5	4,6	4,14 - 5,06
ISO VG 7	6,8	6,12 - 7,48
ISO VG 10	10	9,0 - 11,0
ISO VG 15	15	13,5 - 16,5
ISO VG 22	22	19,8 - 24,2
ISO VG 32	32	28,8 - 35,2
ISO VG 46	46	41,4 - 50,6
ISO VG 68	68	61,2 - 74,8
ISO VG 100	100	90 - 110
ISO VG 150	150	135 - 165
ISO VG 220	220	198 - 242
ISO VG 320	320	288 - 352
ISO VG 460	460	414 - 506
ISO VG 680	680	612 - 748
ISO VG 1000	1000	900 - 1 100
ISO VG 1500	1500	1 350 - 1 650

Viskozitní třídy olejů podle ČSN 65 6601 a porovnání viskozit průmyslových, motorových a převodových olejů podle ISO a SAE uvádí tabulka 13.4.

Tabulka 13.4 Viskozitní třídy olejů podle ČSN 65 6601 - Porovnání viskozit průmyslových motorových a převodových olejů ISO a SAE - [12]

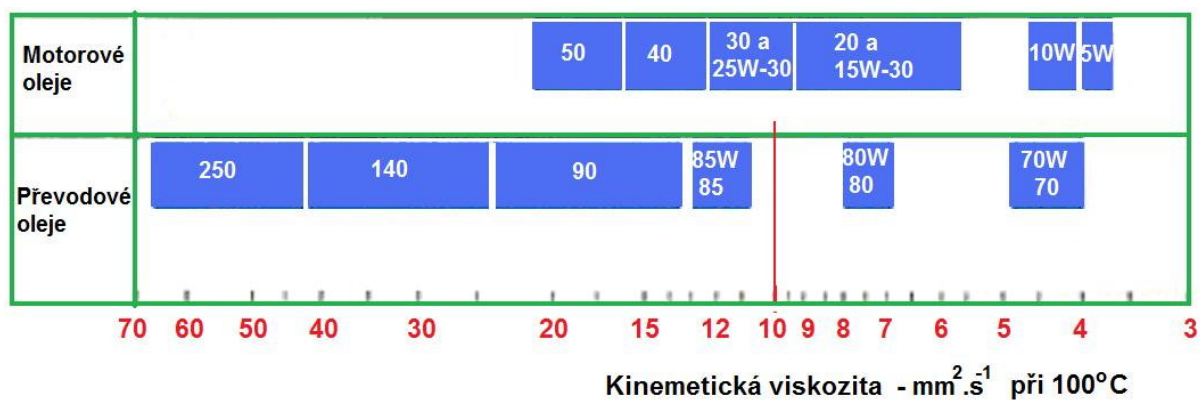
ISO-VG průmyslové oleje	Viskozita při 40°C [mm2/s]		SAE motorové oleje	SAE převodové oleje
	minimální	maximální		
2	1,98	2,42	-	-
3	2,88	3,52		
5	4,14	5,06	0W	
7	6,12	7,48		
10	9,0	11,0		
15	13,5	16,5	5W	70W 75W
22	19,8	24,2	10W	
32	28,8	35,2		
46	41,4	50,6	15W 20W 25W 20	80W
68	61,2	74,8		
100	90	110	30	85W
150	135	165	40	90W
220	198	242	50	
320	288	352	-	140W
460	414	506		250
680	612	748		
1000	900	1100		
1500	1350	1650		

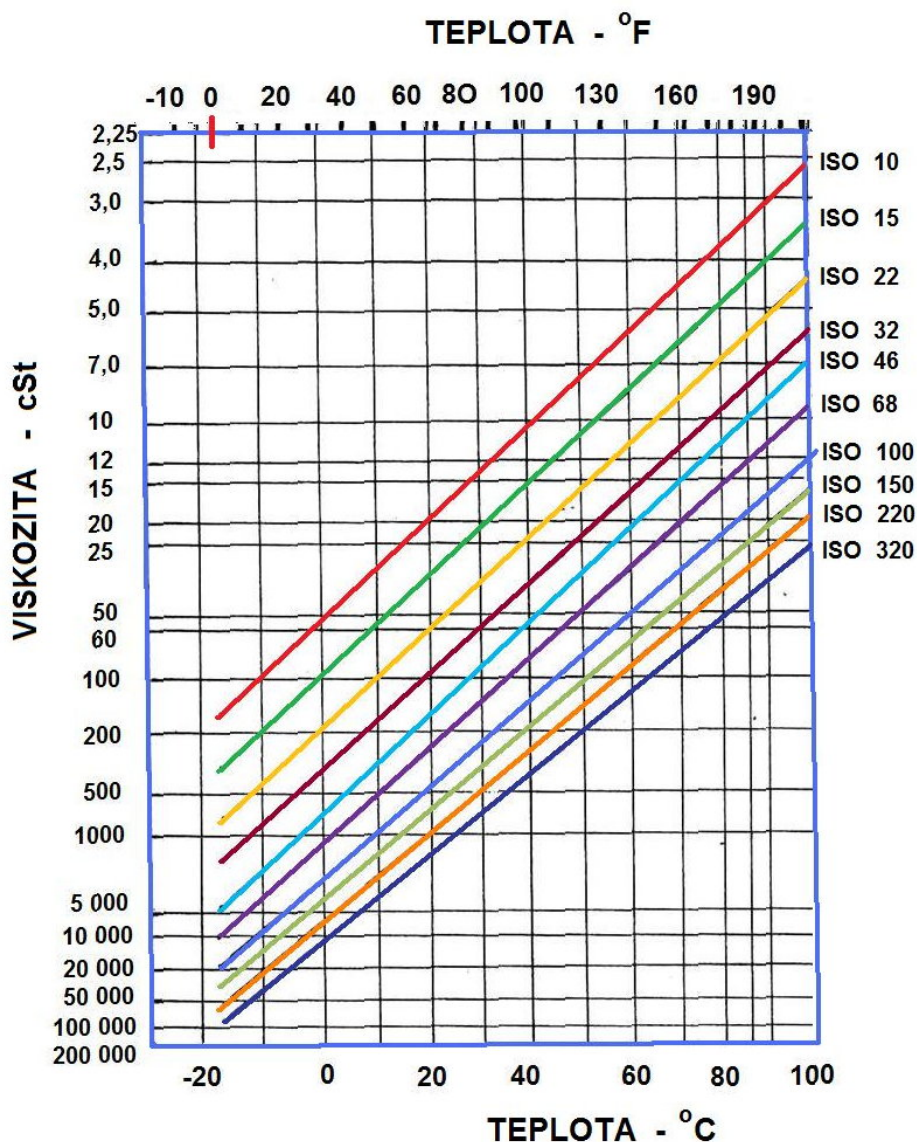
Následující obr. 13.3 uvádí porovnání viskosních tříd olejů podle SAE a ISO VG, příkladem vícerozsahového oleje je olej s označením SAE 80W/90 (splňuje nároky viskozitní třídy 80W i viskozitní třídy 90).



Obr. 13.3 Porovnání viskozitních tříd olejů podle SAE a ISO VG - [12]

Srovnání viskozitních tříd SAE převodových a motorových olejů uvádí tabulka 13.5, obr. 13.4 pak uvádí závislost viskozity olejů na teplotě podle normy ISO.

Tabulka 13.5 Srovnání viskozitních tříd SAE převodových a motorových olejů - [12]



Obr. 13.4 Závislost viskozity olejů podle normy ISO na teplotě - [12]

14. Příklady odhadu viskozity plynů

Odborná literatura pro čisté plyny i kapaliny uvádí hodnoty jejich viskozity. Když viskozita dané látky nebyla měřena, lze viskozitu odhadnout empirickými metodami z jiných známých dat o této látce, k tomuto účelu lze využít obr. 13.1 a obr. 13.2. Označení a rozměr veličin v uvedených obrázcích je následující - [1] :

t - teplota $^{\circ}\text{C}$

η - dynamická viskozita o dané teplotě a tlaku – $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

η^* - redukovaná dynamická viskozita

η^o - dynamická viskozita – $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$

p - tlak - atm

T - teplota - $^{\circ}\text{K}$

Index c - kritická hodnota

r - redukovaná hodnota

Příklad 1

Odhadněte viskozitu dusíku N_2 při teplotě $t = 50^\circ C$ a tlaku $p = 85,4 \text{ MPa}$ (854 atm), je-li $M = 28 \text{ g/mol}$, $p_c = 3,35 \text{ MPa}$ (33.5 atm) a $T_c = 126,2^\circ K$ - [1].

Z empirické rovnice vypočítáme kritickou dyn. viskozitu η_c při krit. tlaku a krit. teplotě

$$\eta_c = 7,7 \cdot M^{0,5} \cdot p_c^{\frac{2}{3}} \cdot T_c^{-\frac{1}{6}} = 7,70 \cdot (28)^{0,5} \cdot (33,5)^{\frac{2}{3}} (126,2)^{-\frac{1}{6}} = \\ = 189 \text{ mikropoise} = 189 \cdot 10^{-6} \text{ g.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$$

Vypočítáme redukovanou teplotu a tlak:

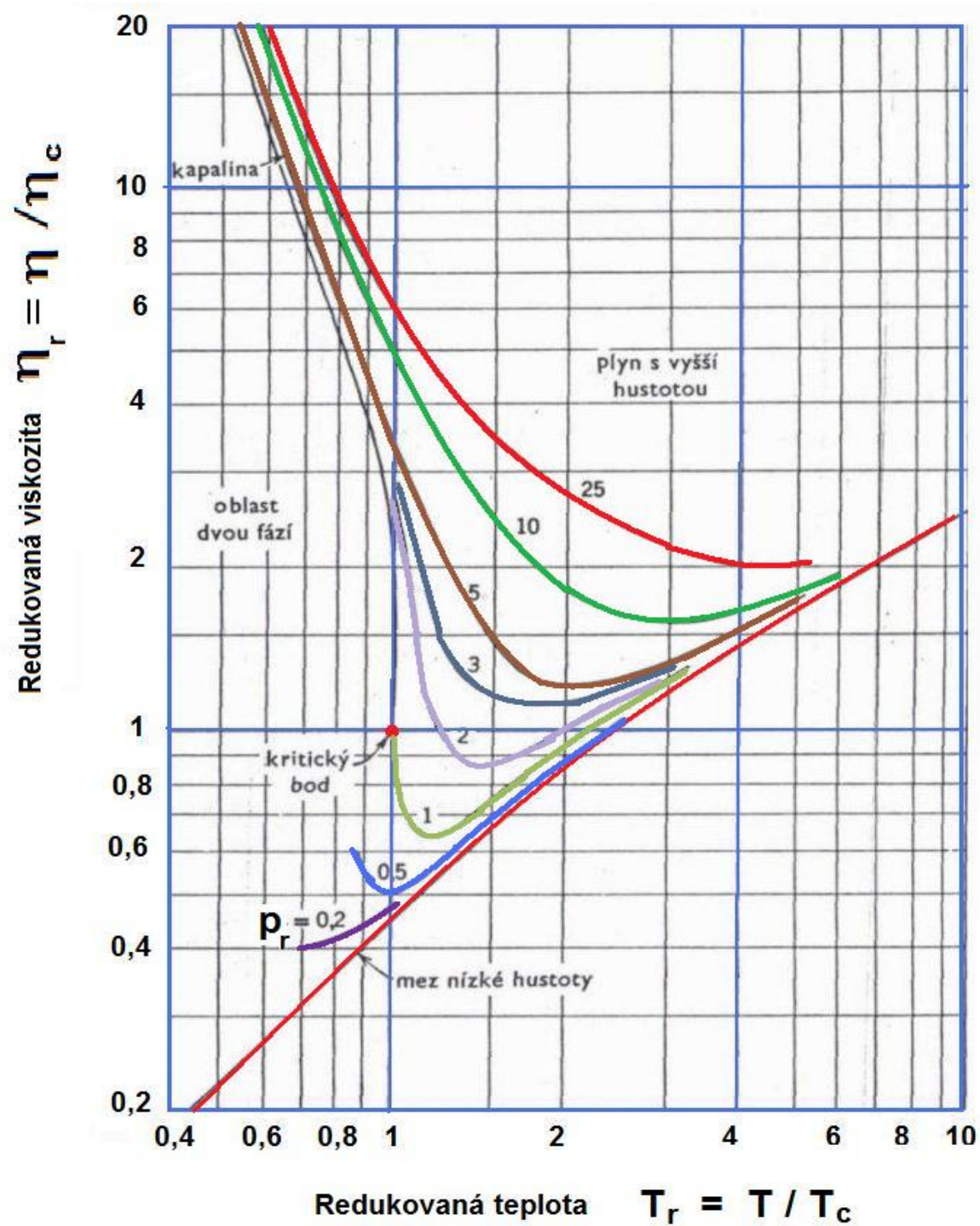
$$T_r = \frac{273,2 + t}{T_c} = \frac{273,2 + 50}{126,2} = 2,56 \\ p_r = \frac{p}{p_c} = \frac{854}{33,5} = 25,5$$

Z obr. 13.1 pro vypočtenou redukovanou teplotu a tlak se odečte $\frac{\eta}{\eta_c} = 2,39$.

Hledaný odhad viskozity je

$$\eta = \eta_c \cdot \left(\frac{\eta}{\eta_c} \right) = 189 \cdot 10^{-6} \cdot 2,39 = 452 \cdot 10^{-6} \text{ g.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Naměřená hodnota je $455 \cdot 10^{-6} \text{ g.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, což je neobvykle dobrá shoda.



Obr. 13.1. Redukovaná viskozita η_r jako funkce jako funkce redukované teploty T_r pro několik hodnot redukovaných tlaků p_r - [1]

Příklad 2

Viskozita kysličníku uhličitého CO_2 při tlaku $p_1 = 4,53 \text{ MPa}$ (45,3 atm) a teplotě $t_1 = 40,3^\circ\text{C}$ je $1800 \cdot 10^{-7}$ poise. Odhadněte viskozitu při tlaku $p_2 = 11,46 \text{ MPa}$ (114,6 atm) a teplotě $t_2 = 40,3^\circ\text{C}$ - [1] .

Redukovaná teplota a tlak odpovídající dané hodnotě viskozity CO_2 jsou:

$$T_r = \frac{273,2 + t_1}{T_c} = \frac{273,2 + 40,3}{304,2} = 1,03$$

$$p_r = \frac{p_1}{p_c} = \frac{45,3}{72,9} = 0,622$$

Z obr 13.2 odečteme při těchto podmínkách redukovanou viskozitu $\eta^* = 1,12$, proto

$$\eta^o = \frac{\eta}{\eta^*} = \frac{1800}{1,12} = 1610 \cdot 10^{-7} \text{ g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}.$$

Redukovaný tlak při hledaných podmínkách je

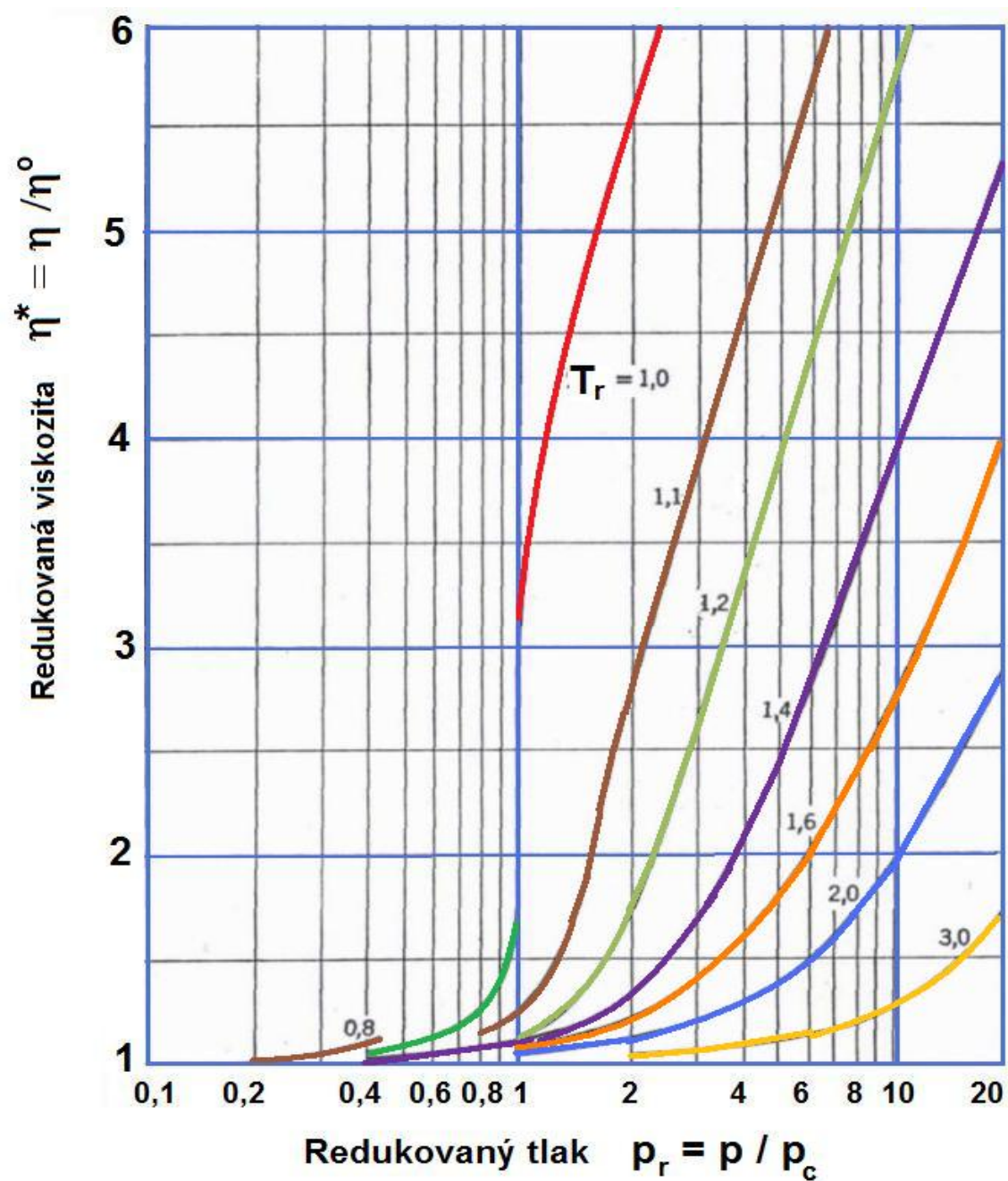
$$p_r = \frac{p_2}{p_c} = \frac{114,6}{72,9} = 1,57 \quad \text{a } T_r = 1,03 \text{ stejně jako nahoře.}$$

Z obr. 13.2 odečteme redukovanou viskozitu $\eta^* = 3,7$.

Předpověděná viskozita při tlaku $p_2 = 11,46 \text{ MPa}$ (114,6 atm) a teplotě $t_2 = 40,3^\circ\text{C}$ je tedy

$$\eta = \eta^* \cdot \eta^o = 3,7 \cdot 1610 \cdot 10^{-7} = 6000 \text{ g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}.$$

Naměřená hodnota viskozity je $5800 \cdot 10^{-7} \text{ g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$, což je dobrá shoda.



Obr. 13.2 Redukovaná viskozita η^* jako funkce redukovaných tlaků p_r a redukované teploty T_r - [1]

15. Tabulky

Tabulka 15.1 Převod mezi veličinami pro viskozitu - [1]

Násobte hodnotu z tabulky při převádění na tyto jednotky → Veličina udaná v těchto jednotkách	$\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$ Poise	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ Pa.s	$\text{lb}_m.\text{ft}^{-1}.\text{s}^{-1}$	$\text{lb}_f.\text{sec.ft}^{-2}$	centipoise	$\text{lb}_m.\text{ft}^{-1}.\text{hr}^{-1}$
$\text{g.cm}^{-1}.\text{s}^{-1}$ Poise	1	10^{-1}	$6,7197.10^{-2}$	$2,0886.10^{-3}$	10^2	$2,4191.10^2$
$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$ Pa.s	10	10	$106,7197.10^{-1}$	$2,0886.10^{-2}$	10^3	$2,4171.10^3$
$\text{lb}_m.\text{ft}^{-1}.\text{s}^{-1}$	1,4882.10	1,4882	1	$3,1081.10^{-2}$	$1,4882.10^3$	3600
$\text{lb}_f.\text{sec.ft}^{-2}$	$4,788.10^2$	$4,788.10^1$	32,174	1	$4,788.10^4$	$1,1583.10^5$
centipoise	10^{-2}	10^{-3}	$6,7197.10^{-4}$	$2,0886.10^{-5}$	1	2,4191
$\text{lb}_m.\text{ft}^{-1}.\text{hr}^{-1}$	$4,1338.10^{-3}$	$4,1338.10^{-4}$	$2,7778.10^{-4}$	$8,6336.10^{-6}$	$4,1338.10^{-1}$	1

Poznámka:

$$760 \text{ mm Hg} = 1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} = 0,101325 \text{ MPa} = 14,69595 \text{ PSI}$$

$$1 \text{ cS} = 0,01 \text{ Stokes} = 1 \text{ mm}^2/\text{s} = 10^{-6}$$

$$1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa} ; \quad 1 \text{ atm} = 0,101325 \text{ MPa} ;$$

$$1 \text{ atm} = 14,69595 \text{ PSI} ; \quad 1 \text{ atm} = 760 \text{ mm Hg sloupce}$$

Tabulka 15.2 Funkční závislosti a indexy korelace pro viskozitu získané z tabelovaných dat metodou nejmenších čtverců - [3]

dynamická viskozita	$\eta [\text{Pa.s}]$	R^2
voda	$0.001745e^{-0.026939t}$	0.9957
suchý vzduch	$1.7189.10^5 e^{0.00248t}$	0.9981
kinematická viskozita	$\nu [\text{m}^2\text{s}^{-1}]$	R^2
voda	$1.744.10^{-6} e^{-0.0268t}$	0.9954
suchý vzduch	$1.3303.10^{-5} e^{0.00595t}$	0.9996

V literatuře lze vyhledat závislosti:

voda:

$$\rho = \frac{1000}{1 + 0.0000194(t - 5)^{1.6923}}$$

$$\nu = \frac{1}{0,5593 + 0,0193.t + 0,000131.t^2 - 0,0000004.t^3}$$

vzduch:

$$\rho = \frac{101325}{287 * (273.15 + t)} ; \quad \eta = (17.1998 + 0.042543.t).10^{-6}$$

Tabulka 15.3 Hustota suchého vzduchu $\rho(t, p)$ [kg.m⁻³] v závislosti na tlaku a teplotě

ρ [Pa] t [°C]	95000	96000	97000	98000	99000	100000	101000
10	1.168	1.182	1.203	1.218	1.224	1.231	1.242
11	1.164	1.178	1.199	1.214	1.219	1.227	1.238
12	1.160	1.173	1.195	1.210	1.215	1.222	1.233
13	1.156	1.169	1.191	1.206	1.211	1.218	1.229
14	1.152	1.165	1.187	1.202	1.207	1.214	1.224
15	1.148	1.161	1.183	1.198	1.203	1.210	1.220
16	1.144	1.157	1.179	1.194	1.200	1.205	1.216
17	1.140	1.153	1.175	1.190	1.196	1.201	1.212
18	1.136	1.149	1.171	1.185	1.191	1.197	1.208
19	1.132	1.145	1.167	1.18	1.187	1.193	1.204
20	1.129	1.141	1.163	1.175	1.183	1.189	1.200
21	1.124	1.137	1.158	1.172	1.178	1.185	1.196
22	1.120	1.134	1.154	1.168	1.173	1.181	1.192
23	1.116	1.130	1.150	1.164	1.169	1.177	1.188
24	1.112	1.126	1.147	1.162	1.165	1.173	1.184
25	1.110	1.122	1.143	1.157	1.161	1.169	1.180
26	1.107	1.118	1.14	1.152	1.157	1.165	1.176
27	1.104	1.115	1.137	1.148	1.153	1.161	1.172
28	1.101	1.111	1.134	1.144	1.150	1.157	1.168
29	1.097	1.107	1.131	1.140	1.146	1.153	1.164
30	1.093	1.104	1.127	1.136	1.142	1.150	1.160

Z tabelovaných dat lze metodou nejmenších čtverců odvodit lineární závislost hustoty vzduchu jako funkci teploty a tlaku

$$\rho = 0,221657 - 0,00344t + 1,0422 \cdot 10^{-5} p$$

Napětí nasycených par (0-40 °C)

$$p = 1175.9 + 646.74 \cdot t$$

Absolutní vlhkost vzduchu f [g.m⁻³]

$$f = 2.117545 + 0.41535022t + 0.02127063t^2 - 1.90997 \cdot 10^{-4}t^3 + 5.235836 \cdot 10^{-6}t^4$$

Tabulka 15.4 Dynamická viskozita vody a páry η [$\mu\text{Pa}\cdot\text{s}$] v závislosti na teplotě a tlaku podle IAPWS-IF 97

$p[\text{MPa}]$ $t [^\circ\text{C}]$	0.01	0.05	0.1	0.2	0.5	1	5	10
0	1792	1792	1792	1791	1791	1789	1780	1768
5	1518	1518	1518	1518	1517	1517	1510	1503
10	1306	1306	1306	1306	1305	1305	1301	1296
20	1002	1002	1002	1002	1001	1001	999.6	997.7
25	890.1	890.1	890.1	890.1	890.0	889.9	889.0	888.0
30	797.4	797.4	797.4	797.3	797.3	797.3	796.9	796.6
40	653.0	653.0	653.0	653.0	653.0	653.1	653.4	653.9
50	10.62	546.8	546.9	546.9	546.9	547.0	547.7	548.6
60	10.95	466.4	466.4	466.4	466.5	466.1	467.5	468.6
70	11.28	403.9	403.9	403.9	404.0	404.1	405.1	406.4
80	11.63	354.3	354.4	354.4	354.5	354.6	355.6	357.0
90	11.98	11.95	314.4	314.4	314.5	314.7	315.7	317.1
100	12.34	12.31	12.27	281.8	281.9	282.0	283.1	284.4
110	12.71	12.68	12.64	254.7	254.8	254.9	256.0	257.3
120	13.8	13.06	13.02	232.1	232.1	232.3	233.3	234.6
130	13.46	13.44	13.41	13.34	213.0	213.1	214.1	215.4
140	13.84	13.82	13.79	13.74	196.6	196.7	197.7	199.0
150	14.23	14.21	14.18	14.13	182.5	182.6	183.6	184.9
160	14.62	14.60	14.58	14.53	14.39	170.3	171.3	172.6
170	15.01	14.99	14.97	14.93	14.81	159.6	160.6	161.8
180	15.41	15.39	15.37	15.33	15.22	15.03	151.1	152.4
190	15.80	15.79	15.77	15.74	15.64	15.46	142.7	143.9
200	16.21	16.19	16.18	16.15	16.05	15.89	135.2	136.4
220	17.01	17.00	16.99	16.96	16.89	16.76	122.2	123.5
240	17.83	17.82	17.81	17.79	17.72	17.62	111.3	112.6
260	18.65	18.64	18.63	18.61	18.56	18.47	101.8	103.2
280	19.47	19.47	19.46	19.45	19.40	19.33	18.83	94.68
300	20.30	20.30	20.29	20.28	20.24	20.18	19.80	86.46
320	21.13	21.13	21.12	21.11	21.08	21.04	20.74	20.70
340	21.96	21.96	21.95	21.95	21.92	21.89	21.67	21.67
360	22.79	22.79	22.79	22.78	22.76	22.74	22.58	22.63
380	23.62	23.62	23.62	23.61	23.60	23.58	23.48	23.56
400	24.45	24.45	24.45	24.45	24.44	24.42	24.37	24.49
420	25.28	25.28	25.28	25.28	25.27	25.26	25.25	25.40
440	26.11	26.11	26.11	26.11	26.10	26.10	26.12	26.29
460	26.93	26.93	26.93	26.93	26.93	26.93	26.98	27.18
480	27.75	27.76	27.76	27.76	27.76	27.76	27.83	28.05
500	28.57	28.57	28.57	28.58	28.58	28.59	28.68	28.91

Tabulka 15.5 Kinematická viskozita vody a páry v $[\text{mm}^2\text{s}^{-1}]$ v závislosti na teplotě a tlaku podle IAPWS-IF 97

$p[\text{MPa}]$ $t[^\circ\text{C}]$	0.01	0.05	0.1	0.2	0.5	1	5	10
0	1.7921	1.7920	1.7918	1.7915	1.7904	1.7887	1.7754	1.7594
5	1.5184	1.5183	1.5182	1.5179	1.5172	1.5160	1.5066	1.4954
10	1.3064	1.3064	1.3063	1.3061	1.3056	1.3047	1.2980	1.2900
20	1.0035	1.0035	1.0034	1.0033	1.0031	1.0026	0.99915	0.99502
25	0.89278	0.89275	0.89272	0.89265	0.89246	0.89215	0.88966	0.88671
30	0.80087	0.800085	0.800083	0.800078	0.800065	0.800042	0.79866	0.79658
40	0.65812	0.65811	0.65810	0.65808	0.65801	0.65791	0.65710	0.65616
50	157.89	0.55347	0.55347	0.55346	0.55344	0.55341	0.55315	0.55288
60	167.88	0.47437	0.47437	0.47437	0.47347	0.47438	0.47446	0.47459
70	178.31	0.41308	0.41308	0.41309	0.41311	0.41314	0.41343	0.41380
80	189.20	0.36463	0.36464	0.36465	0.36468	0.36473	0.36514	0.36567
90	200.52	39.707	0.32571	0.32572	0.32576	0.32582	0.32631	0.32694
100	212.28	42.091	20.810	0.29400	0.29404	0.29411	0.29465	0.29534
110	224.49	44.558	22.062	0.26785	0.26789	0.26796	0.26853	0.26926
120	237.12	47.109	23.353	0.24605	0.24609	0.24617	0.24676	0.24750
130	250.20	49.744	24.685	12.149	0.22777	0.22785	0.22845	0.22920
140	263.70	52.463	26.056	12.848	0.21224	0.21231	0.21292	0.21368
150	277.64	55.267	27.469	13.566	0.19898	0.19905	0.19966	0.20042
160	292.00	58.154	28.922	14.303	5.5218	0.18766	0.18827	0.18903
170	306.79	61.125	30.416	15.059	5.8373	0.17782	0.17843	0.17918
180	322.00	64.180	31.951	15.835	6.1590	2.9214	0.16987	0.17063
190	337.64	67.318	33.527	16.630	6.4873	3.0971	0.16241	0.16316
200	353.69	70.539	35.144	17.446	6.8225	3.2741	0.15587	0.15662
220	387.05	77.229	38.501	19.136	7.5143	3.6356	0.14504	0.14579
240	422.07	84.249	42.021	20.906	8.2354	4.0086	0.13655	0.13731
260	458.73	91.594	45.702	22.755	8.9863	4.3945	0.12981	0.13060
280	497.00	99.261	49.543	24.684	9.7675	4.7939	0.79612	0.12523
300	536.88	107.25	53.543	26.691	10.579	5.2073	0.89783	0.12088
320	578.34	115.55	57.700	28.775	11.420	5.6348	0.99837	0.39898
340	621.36	124.16	62.012	30.937	12.292	6.0767	1.0992	0.46571
360	665.93	133.08	66.478	33.176	13.194	6.5329	1.2010	0.52780
380	712.02	142.31	71.096	35.489	14.125	7.0034	1.3044	0.58797
400	759.62	151.84	75.864	37.877	15.086	7.4882	1.4095	0.64741
420	808.70	161.66	80.779	40.339	16.075	7.9872	1.5166	0.70673
440	859.25	171.78	85.841	42.874	17.094	8.5003	1.6258	0.76632
460	911.25	182.18	91.047	45.481	18.141	9.0273	1.7373	0.82640
480	964.68	192.87	93.396	48.158	19.216	9.5681	1.8510	0.88714
500	1019.5	203.84	101.89	50.906	20.318	10.123	1.9670	0.94865

Tabulka 14.6 Převod kinematické viskozity Centistokes – SSU Saybolt Sekond Universal

Centistokes (cSt)	Stokes (S)	Saybolt Seconds Universal (SSU)	Centistokes (cSt)	Stokes (S)	Saybolt Seconds Universal (SSU)
cSt	S	SSU	cSt	S	SSU
10^{-6} m/s^2	10^{-4} m/s^2		10^{-6} m/s^2	10^{-4} m/s^2	
1	0.01	31	1100	11	5200
2	0.02	34	1200	12	5620
4	0.04	38	1300	13	6100
7	0.07	47	1400	14	6480
10	0.1	60	1500	15	7000
15	0.15	80	1600	16	7500
20	0.2	100	1700	17	8000
25	0.25	130	1800	18	8500
30	0.3	160	1900	19	9000
40	0.4	210	2000	20	9400
50	0.5	260	2100	21	9850
60	0.6	320	2200	22	10300
70	0.7	370	2300	23	10750
80	0.8	430	2400	24	11200
90	0.9	480	2500	25	11600
100	1	530	3000	30	14500
120	1.2	580	3500	35	16500
140	1.4	690	4000	40	18500
160	1.6	790	4500	45	21000
180	1.8	900	5000	50	23500
200	2	1000	5500	55	26000
220	2.2	1100	6000	60	28000
240	2.4	1200	6500	65	30000
260	2.6	1280	7000	70	32500
280	2.8	1380	7500	75	35000
300	3	1475	8000	80	37000
320	3.2	1530	8500	85	39500
340	3.4	1630	9000	90	41080
360	3.6	1730	9500	95	43000
380	3.8	1850	15000	150	69400
400	4	1950	20000	200	92500
420	4.2	2050	30000	300	138500
440	4.4	2160	40000	400	185000
460	4.6	2270	50000	500	231000
480	4.8	2380	60000	600	277500
500	5	2480	70000	700	323500
550	5.5	2660	80000	800	370000
600	6	2900	90000	900	415500
700	7	3380	100000	1000	462000
800	8	3880	125000	1250	578000
900	9	4300	150000	1500	694000
1000	10	4600	175000	1750	810000
1100	11	5200	200000	2000	925000

Viskozita vybraných plynů

Podle Kestinových údajů byly pro vybrané plyny aproximovány následující empirické rovnice dynamické viskozity plynů jako funkce tlaku a teploty, rovnice uvádí následující tabulka:

Tabulka 14.7 Empirická rovnice pro dyn. Viskozitu vybraných plynů jako funkce teploty a tlaku

č.	Plyn	Rovnice
1	Vzduch	
2	Kyslík	$\eta = 0.0190395 + 6,50043 \cdot 10^{-5} \cdot t - 8,97542 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 +$ $+ 8,97542 \cdot 10^{-7} \cdot p + 6,13118 \cdot 10^{-10} \cdot p^2$
3	Dusík	$\eta = 0.0167214 + 3,92728 \cdot 10^{-5} \cdot t + 1,22474 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 +$ $+ 8,56087 \cdot 10^{-7} \cdot p + 4,69295 \cdot 10^{-10} \cdot p^2$
4	Kys.uhličitý	$\eta = 0.0137339 + 4,41133 \cdot 10^{-5} \cdot t + 1,12987 \cdot 10^{-7} \cdot t^2 +$ $+ 4,33063 \cdot 10^{-8} \cdot p + 2,67625 \cdot 10^{-9} \cdot p^2$
5	Helium	$\eta = 0.0208762 + 7,0219 \cdot 10^{-5} \cdot t - 3,30712 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 +$ $+ 1,19960 \cdot 10^{-6} \cdot p$
6	Argon	$\eta = 0.0208762 + 7,0219 \cdot 10^{-5} \cdot t - 3,30712 \cdot 10^{-8} \cdot t^2 +$ $+ 1,19960 \cdot 10^{-6} \cdot p + 7,24294 \cdot 10^{-10} \cdot p^2$

Tabulka 14.8 Vypočtená velikost dyn. Viskozity suchých plynů podle empirických rovnic z předcházející tabulky pro $t = 20^\circ\text{C}$ a tlak 760 mm Hg

Plyn	Teplota	Tlak	Dyn. viskozita	Relativní chyba
	$^\circ\text{C}$	760 mm Hg	cP	%
Vzduch	20			0,05
Kyslík	20	14,69595	0,020317	0,03
Dusík	20	14,69595	0,017569	0,03
Kys.uhličitý	20	14,69595	0,014663	0,02
Helium	20	14,69595	0,019616	0,02
Argon	20	14,69595	0,022285	0,03

Literatura

- [1] Bird, B.R., Steward, W.E., Lightfoot, E.N.,: Přenosové jevy. Academia 1968, str. 799
- [2] Schramm, G.: Introduction to Practical Viscometry, interní publikace f. Haake
- [3] Drábková, S Kozubková, M. : Cvičení z mechaniky tekutin, Skripta VŠB TU Ostrava, 2001, str. 145
- [4] Janalík, J.: Potrubní hydraulická a pneumatická doprava, Skripta VŠB-TU Ostrava , 1999, 194 s.

Internetové zdroje

- [5] www.helago.cz
- [6] www.aandd.co.jp
- [7] www.gardco.com
- [8] www.marci.cz
- [9] www.maneko.cz
- [10] www.hydramotion.com
- [11] www.thermo.com
- [12] www.oleje.cz
- [13] www.cambridgeviscosity.com
- [14] www.tpab.com
- [15] www.delhi.inetgiant.in
- [16] www.gardco.com
- [17] www.globalspec.com
- [18] www.zone.ni.com
- [19] www.enotes.com
- [20] www.indiamart.com

Přehled použitých označení

Označení	Jednotka	Veličina
A	J	práce
D	m	průměr potrubí
E	J	energie, kinetická energie
F	$N = kg \cdot m \cdot s^{-2}$	síla
F_p	N	odporová síla
F_v	N	vztlaková síla
F_t	N	tečná síla, třecí síla
G	N	tíha (= F_g)
H	$kg \cdot m \cdot s^{-1}$	hybnost
H	$kg \cdot m \cdot s^{-2}$	průtoková hybnost
K	$Pa \cdot s^n$	součinitel konsistence
L	m	délka
M	$N \cdot m = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$	krouticí moment
Q_m	$kg \cdot s^{-1}$	hmotnostní průtok
Q_v	$m^3 \cdot s^{-1}$	objemový průtok
R	m	poloměr
Re	1	Reynoldsovo číslo
S	m^2	plocha
T	K	absolutní teplota
T	1	Taylorovo číslo
V	m^3	objem
b	m	šířka
b	1	součinitel tlumení
c	m/s	rychlost tepelného pohybu molekul
c_x	1	součinitel odporu
d	m	průměr
f	s^{-1}	frekvence
g	$m \cdot s^{-2}$	tíhové zrychlení
h	m	výška, svislá vzdálenost, hloubka
h_z	m	ztrátová výška
j	s^{-1}	gradient rychlosti
k	$N \cdot m^{-1}$	tuhost
l	m	délka
m	kg	hmotnost
n	1	index toku
n	s^{-1}	otáčky
p	$Pa = N \cdot m^{-2}$	tlak
r	m	poloměr
s	m	dráha
t	$^{\circ}C$	teplota
t	s	čas
v	$m \cdot s^{-1}$	rychlost
w	$m \cdot s^{-1}$	sedimentační rychlost
α	deg	úhel

φ	deg	úhel
κ	1	izoentropický exponent
λ	1	součinitel tření
λ	m	volná dráha molekul
η_a	Pa.s	zdánlivá viskozita
η_Δ	Pa.s	diferenciální viskozita
μ_B	Pa.s	Binghamova viskozita
ν	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$	kinematická viskozita
ρ	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	hustota
τ	Pa	tečné (smykové napětí)
τ_p	Pa	počáteční smykové napětí
ω	s^{-1}	úhlová rychlost
ω_o	s^{-1}	vlastní úhlová frekvence

Index dolní:

x,y,z	-	směr x, y, z
o	-	klidový stav
stř	-	střední
max	-	maximální
kr	-	kritický
s	-	stěna, střední