Úvod
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 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 rovnoběžně a tekutina se nepromíchává, pro tečné napětí formuloval Newtonův zákon, podle něhož je tangenciální napětí v kapalině úměrné dynamické vazkosti a gradientu rychlosti.

Viskozita Newtonovských a ne-newtonovských kapalin
(rotační viskozimetr)
Smyková, tečná napětí, gradient, vnitřní tření, viskozita, plasticita, tvarovatelnost.

Princip
Viskozitu kapalin lze zjišťovat rotačním viskozimetrem. Rotační viskozimetry je založen na měření torzního momentu, jímž působí rotující kapalina na element zavěšený na torzním vlákně. Zařízení se sestává ze dvou soustředných válců, mezi nimiž je úzká mezera, vyplněná měřenou kapalinou. Jeden z elementů se otáčí konstantní úhlovou rychlostí, vnitřním třením kapaliny je otáčivý moment přenášen na druhý element, zavěšený na torzním vlákně. Odporem kapaliny proti pohybu vytváří kroutící moment, který se zkoumá pomocí spirálové pružiny a jeho velikost se odečítá přímo na stupnici. Rotační viskozimetry jsou vhodné i ke studiu nenewtonských kapalin, neboť umožňují měřit úhel pootočení (úměrný napětí) v závislosti na rychlosti otáčení (ta je úměrná rychlosti deformace).

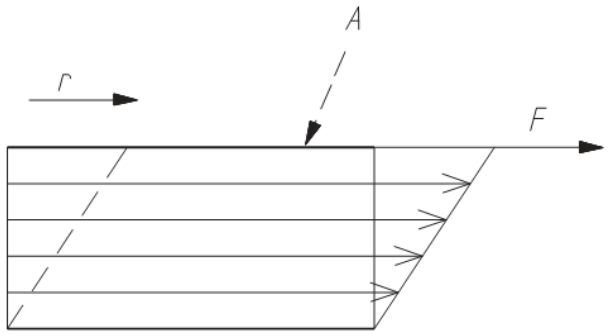
Úkoly
Určete gradient rotační rychlosti jako funkci torzního smykového napětí pro dvě Newtonovské kapaliny (glycerin, tekutý parafin).
Určete výstupní tokové křivky pro nenewtonovské kapaliny (čokoláda).
Vyšetřete teplotní závislost viskozity oleje a glycerinu.

Zařízení:
Rotační viskozimetr s příslušenstvím, ohřívadlo s magnetickou míchačkou, teploměr, potřebné nádoby a kapaliny (aspoň 250ml).

Nastavení a postup
Sestavený experiment je zobrazen na fotografii. Rotační viskozimetr pečlivě nastavte do vertikální polohy. K tomu slouží seřizovací šrouby a kontrola pomocí vodováhy na podložce viskozimetru. Spusťte viskozimetr až k povrchu měřené kapaliny přesně na kalibrační značku otočného tělesa. Připojte externí kontaktní teploměr k magnetické míchačce a nastavte na příslušnou experimentální teplotu (25 ° C pro první měření). Umístěte míchadlo do skleněné kádinky a za stálého míchání vyčkejte dokud teplota nezůstane konstantní po dobu několika minut. Po dosažení tepelné rovnováhy vypněte magnetickou míchačku a změřte viskozitu kapaliny, jak je popsáno v návodu, který je dodáván s otočným viskozimetru.

Pro glycerol a tekutý parafin stanovte závislost kroutícího moment na frekvenci v rozsahu mezi 0,1 Hz a 1,0 Hz. V druhém pokusu určete teplotní závislost viskozity glycerolu a ricinového oleje v mezi teplotami 25 a 70°C v pěti krocích. Nakonec změřte závislost kroutícího momentu na frekvenci v rozsahu 0,1 Hz až 1,0 Hz při teplotě 30 ° C.
Po každé sérii měření vyčistěte pečlivě viskozimetr vodou nebo acetonem.
Jiné látky vhodné pro experimenty jsou oleje, etylenglykol jakožto newtonovské kapaliny, a barvy, sirup nebo maziva jako nenewtonské kapaliny.

Teorie a rozbor
O ideální kapalině předpokládáme, že v ní neexistují tečná - tzv. smyková napětí. Pro reálnou kapalinu to platí pouze tehdy, jsou-li její jednotlivé části vůči sobě v klidu. Proudí-li reálná kapalina, tj. jsou-li její části v relativním pohybu a dvě po sobě se posouvající vrstvy ka paliny mají různou rychlost, dochází mezi nimi ke tření.
Tečná – v podstatě třecí síla a tím i tečné (smykové) napětí τ (podíl tečné síly a velikosti styčné plochy) jsou nenulové. Tečné napětí, které je kompenzováno proměnnou rychlostí kapaliny, je tím větší, čím více se mění rychlost od vrstvy k vrstvě. Změnu rychlosti, kterou bychom pozorovali při postupu od vrstvy k vrstvě kolmo ke směru proudění, můžeme charakterizovat podílem dv/dy - gradientem rychlosti ve směru kolmém k proudu. Při laminárním proudění, při němž probíhají proudová vlákna souběžně a kapalina se nepromíchává, je tečné napětí úměrné gradientu rychlosti.



Rychlostní gradient a smykové napětí

Pokud tenká vrstva kapaliny leží mezi dvěma skleněnými destičkami, pak pohyb desek vůči sobě vyžaduje aplikaci nějaké síly. Vrstvy kapaliny přiléhající přímo k povrchu každé z destiček jsou přidržovány adhezními silami a mezi molekulami vlastní kapaliny působí kohezní síly soudržnosti. Pohyb destičky vyvolá v nejbližším okolí pohyb v kapalině, předává se určitá hybnost, tu pak tato vrstva kapaliny předává částečně své sousední vrstvě tekutiny, takže i další a další vrstvy se začnou pohybovat. V kapalině se tak postupně ustaví lineární gradient rychlostí – rychlostní profil mezi oběma deskami.
Označíme-li vzdálenost mezi oběma deskami *dx* a rozdíl rychlostí *dv*, pak *F* síla potřebná k pohybu kapalné vrstvy bude podle Newtona:

$$F = \eta A \frac{dv}{dx}. \quad (1)$$

Tato síla je úměrná velikosti plochy *A* a rychlostnímu gradientu $\frac{dv}{dx}$. Faktor η v rovnici značí dynamickou viskozitu. Podíl *F/A* nazveme smykové napětí τ,

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx}, \quad (2)$$ kde

A velikost kontaktní plochy mezi destičkou a kapalinou
η viskozita kapaliny
dv/dx rychlostní gradient.
Tato rovnice představuje Newtonův zákon viskozity. Vidíme, že dynamická viskozita je rovna podílu smykového napětí a rychlostního gradientu.

Měřidlem v tomto experimentu je rotační viskozimetr. Skládá se z vnitřního a vnějšího válce. Zkoumaná kapalina se nachází mezi nimi. Při nízké rychlosti otáčení otáčivý moment *T (r),* jímž je poháněna válcová vrstva kapaliny s poloměrem *r* a výškou *h* odpovídá následujícímu vztahu jako důsledek otáčení vnějšího nebo vnitřního válce:

$$T(r) = \tau \cdot 2\pi r h \cdot r \quad (3)$$

Smykové napětí lze vyjádřit pomocí měřitelného otáčivého momentu jako:

$$\tau(r) = \frac{T}{2\pi r^2 h} \quad (4)$$

V tomto případě rychlostní gradient D vyjádříme pomocí úhlové rychlosti ω

$$D(r) = r\frac{d\omega}{dr} \qquad (5)$$

Vhodné substituce v rovnicích (2), (4) a (5) a integrace za okrajových podmínek $\omega = 0$ pro $r=R_1$ a $\omega = f$ pro $r=R_2$ (kde R_1, R_2 jsou poloměry příslušných válců) dávají následující vztah mezi měřeným otáčivým momentem a úhlovou rychlostí

$$T = \frac{4\pi R_1^2 - R_2^2 h}{R_2^2 - R_1^2}\eta f = C\eta f \qquad (6),$$ kde C je konstanta přístroje a f frekvence otáčení.

Pokud je provedena korekce na vliv okrajových jevů, stává se C je empirickou konstantou, tedy závisí na konkrétním zařízení.

Tekutiny, jejichž viskozita je nezávislá na smykovém napětí a na gradientu rychlosti se nazývají newtonovské kapaliny. Jde obvykle o kapaliny s nízkou molekulovou hmotností, zředěné suspenze se sférickými částicemi a čisté velmi tekuté mazací oleje.
U koloidních roztoků a suspenzí s vyšší koncentracích částic, krystalických kapalin, tavenin již viskozita není konstantní při dané teplotě. Takové ne-newtonovské kapaliny vykazují komplexní korelaci mezi τ a celkovým gradientem rychlosti D.
Koloidní roztok je roztok, který obsahuje rozpuštěné částice velikost mezi 10^{-5} a 10^{-7} cm.
Viskozita koloidních roztoků závisí nejen na koncentraci, ale také na tvaru molekul.
Sférické koloidy (glykogeny, různé bílkoviny) mají přibližně sférický tvar částic. Viskozita roztoků je dána rovnicí

$$\frac{\eta}{c} = K \qquad (7),$$

c je koncentrace, K je konstanta, která má stejnou hodnotu pro homologií polymerní látky.
Lineární koloidy (parafiny, guma, celulóza, polystyren) mají tyčovité nebo listové tvary částic. Viskozita roztoků o stejné koncentraci z homologické řady polymerů je závislá na molekulární délce a roste s zvýšením stupně polymerace. V takových případech je viskozita závislá na molekulové hmotnosti.

$$\frac{\eta}{c} = K\,M \qquad (8).$$

Viskozita je veličina velmi závislá na teplotě. Kapaliny vykazují pokles viskozity se zvýšením teploty. Když je energie je dodávána, průměrná energie molekul se zvyšuje a vzájemné síly přitažlivosti mezi molekulami kapaliny stává méně znatelné. Pro většinu kapalin platí následující rovnice:

$$\ln\eta = \frac{E}{RT} + \ln C \qquad (9)$$

C materiálová konstanta
E energie nutná k překonání mezimolekulárních sil.
Při zvýšení teploty o 1K viskozita klesne přibližně o 2%.

Fig. 3: Moment of rotation as a function of the frequency for a Newtonian liquid.
+ Glycerol
o Liquid paraffin

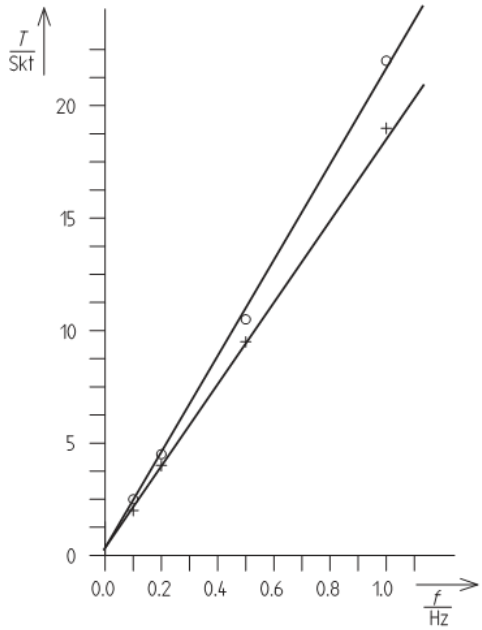


Fig. 4: Moment of rotation as a function of the frequency for a non-Newtonian liquid (chocolate at 302 K)

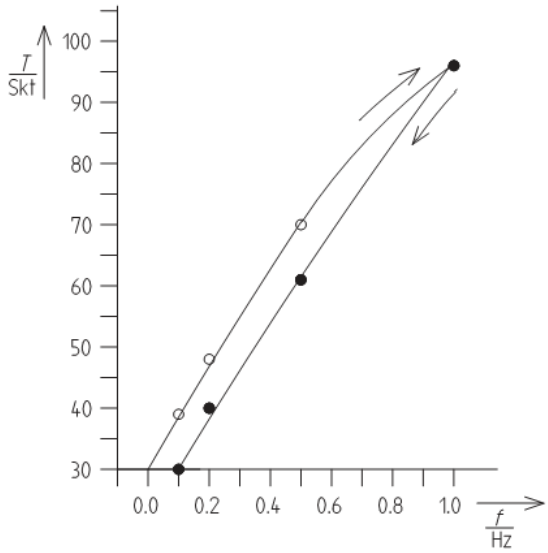


Fig. 5: Temperature dependence of the viscosity of glycerol

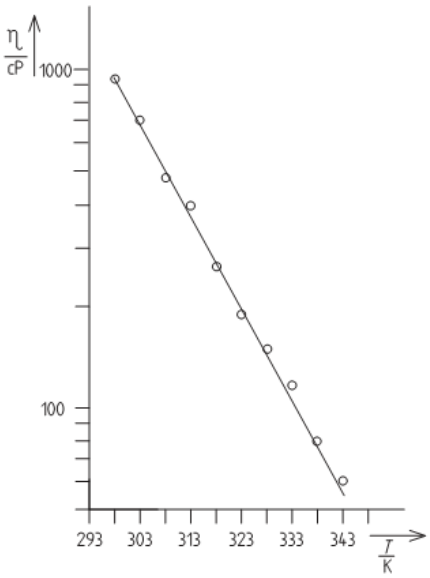
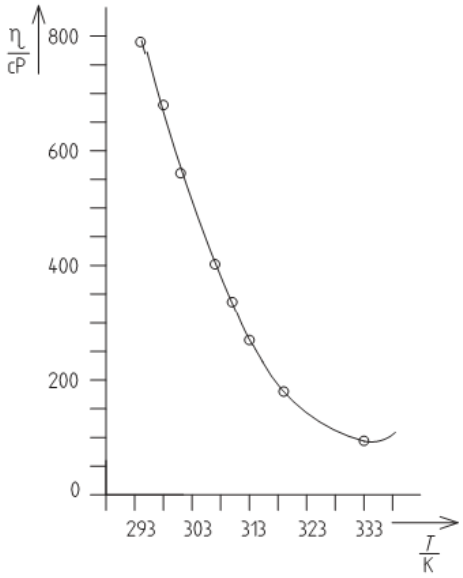


Fig. 6: Temperature dependence of the viscosity of castor oil



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)

$$\tau = \eta_a \frac{dv}{dy} = \eta_a . j \quad , \tag{2.1}$$

kde η_a je zdánlivá viskozita definovaná rovnicí

$$\eta_a = \frac{\tau}{\frac{du}{dr}} = \frac{\tau}{j} . \tag{2.2}$$

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.

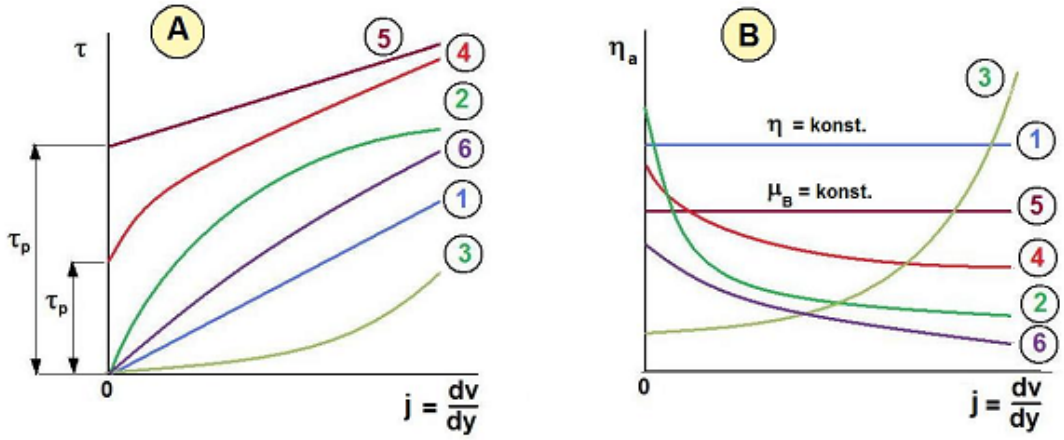
Vedle zdánlivé viskozity se používá pro hodnocení nenewtonovské kapaliny při určitém smykovém napětí tzv. diferenciální viskozita daná rovnicí

$$\eta_\Delta = \frac{d\tau}{dj} . \tag{2.3}$$

Protože ani zdánlivá ani diferenciální viskozita nejsou pro nenewtonovskou kapalinu konstantní, je třeba pro fyzikální ohodnocení těchto kapalin udávat jejich závislost na smykovém napětí. Při studiu nenewtonských 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 nenewtonské chování tekutin

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

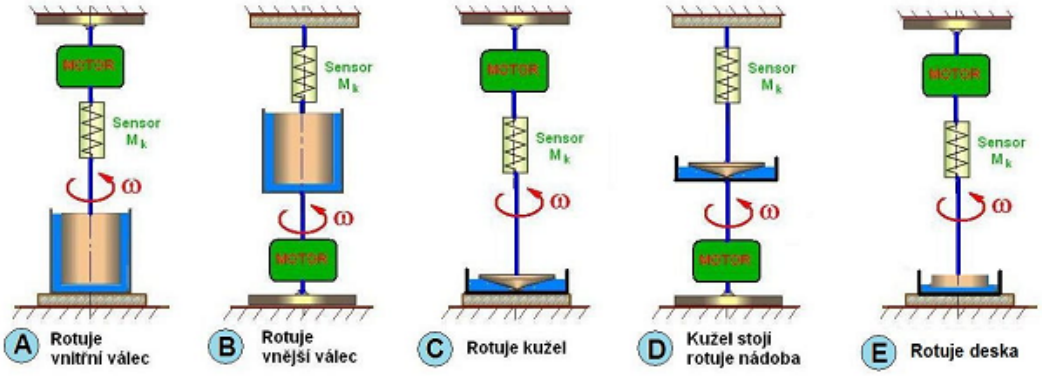


Obr. 2.1 Reogramy a zdánlivá viskozita vybraných nenewtonských kapalin A - reogram; B – zdánlivá viskozita – [4]

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

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. Přímo 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 kroutící 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