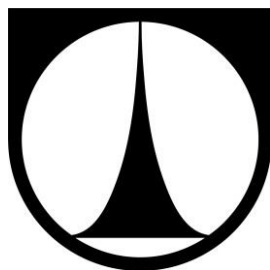


TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta strojní



**LABORATORNÍ MĚŘENÍ
VISKOZITY KAPALIN**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní



Laboratorní měření viskozity kapalin

Bakalářská práce

Studijní program: B2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301R000 – Strojní inženýrství
Autor práce: **Pavel Kotyk**
Vedoucí práce: doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.





TECHNICAL UNIVERSITY OF LIBEREC
Faculty of Mechanical Engineering ■

Laboratory measurements of viscosity fluids

Bachelor thesis

Study programme: B2301 – Mechanical Engineering
Study branch: 2301R000 – Mechanical Engineering
Author: **Pavel Kotyk**
Supervisor: doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel Kotyk**
Osobní číslo: **S13000522**
Studijní program: **B2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojní inženýrství**
Název tématu: **Laboratorní měření viskozity kapalin**
Zadávací katedra: **Katedra energetických zařízení**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Provedte rešerši literatury o principech měření viskozity kapalin. Popište zákony popisující vliv viskozity při proudění tekutin, uveďte vztahy pro dynamickou a kinematickou viskozitu.
2. Popište vibrační viskozimetr SV-10, vytvořte stručný návod na měření. Provedte na přístroji měření dodaných vzorků kapalin v závislosti na teplotě.
3. Popište rotační viskozimetr Rheotest, vytvořte stručný návod na měření. Provedte na přístroji měření dodaných vzorků v závislosti na teplotě.
4. Popište přenosný hustoměr DMA 35, vytvořte stručný návod na měření. Provedte na přístroji měření dodaných vzorků v závislosti na teplotě.
5. Měření zpracujte (vypočítejte kinematickou a dynamickou viskozitu). U vhodných vzorků porovnejte výsledky získané z obou přístrojů pro měření viskozity.
6. V závěru porovnejte vhodnost obou přístrojů k měření, jejich výhody a nevýhody, formulujte závěry z měření.

Rozsah grafických prací: -

Rozsah pracovní zprávy: cca 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná

Seznam odborné literatury:

- [1] **Anton Paar.** Přenosný hustoměr DMA 35, manuál k přístroji.
- [2] **A&D Company, Limited.** Vibrační viskozimetr SV-10, manuál k přístroji.
- [3] **CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. et al., 1993.** Větrání a klimatizace, Technický průvodce, ročník XLVIII.. Praha: SNTL.
- [4] **DVOŘÁK, V., ŠULC, J. a URBÁŠEK, J., 2005.** Technická měření - návody na cvičení. Liberec: TUL.

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.

Katedra energetických zařízení

Konzultant bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Vít, Ph.D.

Katedra energetických zařízení

Datum zadání bakalářské práce: **2. března 2015**

Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2016**


prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan




doc. Ing. Václav Dvořák, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. března 2015

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem. Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum: 1. 7. 2015

Podpis: 

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Václavu Dvořáku, Ph.D. za odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Za podporu také děkuji rodině a přítelkyni.

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřená především na viskozitu a její laboratorní měření. Vysvětluje metody, kterými se viskozita měří a popisuje vybrané viskozimetry. Jejich principy a návody k použití. Nechybí měření na obou viskozimetrech, porovnání výsledků a zhodnocení výhod a nevýhod. Cílem bakalářské práce bylo vytvořit dokument použitelný jako návod k měření viskozity.

Klíčová slova

Viskozita, měření viskozity, rotační viskozimetr, vibrační viskozimetr, hustota

Abstract

This thesis is focused especially on the viscosity and its laboratory measurements. Explains the methods which the viscosity is measured and describes two viscometers. Their principles and manuals. Part of the thesis is also practical. This part contains measurements on both viscometers, comparing results and benefits of individual viscometers. The aim of this thesis was to create a document to be used as a guide for measuring viscosity

Keywords

Viscosity, measurement of viscosity, rotational viscometer, vibratory viscometer, density

OBSAH

Úvod.....	9
1. Viskozita.....	10
1.1 Vznik viskozity při proudění.....	11
1.2 Proudění reálné tekutiny.....	12
2. Měření viskozity.....	14
2.1 Kapilární viskozimetr.....	15
2.2 Výtokový viskozimetr.....	17
2.3 Tělískový viskozimetr.....	17
2.3.1 Stokesův viskozimetr.....	19
2.4 Rotační viskozimetr.....	20
2.4.1 Rotační viskozimetr Rheotest.....	22
2.4.2 Úloha měření viskozity pomocí rotačního viskozimetru Rheotest.....	24
2.5 Vibrační viskozimetr.....	26
2.5.1 Kalibrace viskozimetru SV-10.....	27
2.5.2 Zjednodušená kalibrace.....	28
2.5.3 Úloha měření viskozity pomocí vibračního viskozimetru SV-10.....	28
3. Hustota a její měření.....	31
3.1 Přenosný hustoměr DMA 35.....	31
3.1.1 Princip měření hustoty hustoměrem DMA 35.....	31
3.2 Úloha měření hustoty přenosným hustoměrem DMA 35.....	32
4. Praktická část.....	34
4.1 Olej na ozubená kola.....	34
4.1.1 Graf.....	35
4.2 Valvoline 10W-40.....	36
4.2.1 Graf.....	37
4.3 Parafinový olej.....	38
4.3.1 Graf.....	39
4.4 Destilovaná voda.....	40
4.4.1 Graf.....	41
5. Závěr.....	42
6. Seznam obrázků.....	43
7. Seznam symbolů.....	44

ÚVOD

Viskozita patří mezi základní vlastnosti tekutin. Zajímá nás například viskozita motorových olejů, které slouží k mazání a brání tak opotřebení třením. Viskozita se dá měřit několika způsoby pomocí přístrojů zvaných viskozimetry. Ty se od sebe dělí podle principu, kterým je viskozita měřena. Existuje spousta různých viskozimetrů, tato bakalářská práce je zaměřená na ty nejběžnější a nejpoužívanější.

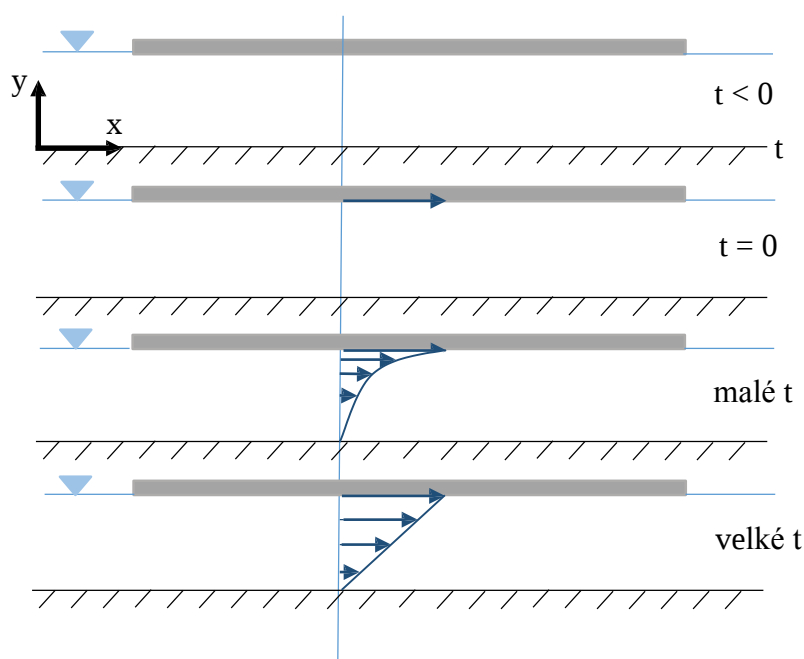
Nalezneme zde bližší seznámení s dvěma konkrétními viskozimetry, jedná se o rotační viskozimetr Rheotest a vibrační viskozimetr SV-10. Nechybí zde podrobný popis obou viskozimetrů, jejich návod k použití a výsledky z měření několika vzorků.

S viskozitou blízce souvisí také hustota, která je potřebná k výpočtu kinematické viskozity. K měření hustoty jsme použili přenosný viskozimetr DMA 35, který je v práci také popsán. Především se budeme zabývat závislostí těchto veličin na teplotě.

Bakalářská práce by měla být dokumentem použitelným jako návod při měření hustoty a především viskozity.

1. Viskozita

Pro ideální tekutinu předpokládáme, že v ní neexistují tečná napětí. Pro skutečnou tekutinu to platí pouze v případě, že tekutina se nepohybuje. V případě, že tekutina proudí a její jednotlivé elementární 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 jsou jednotlivé proudnice 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 předpokládáme 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 . 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, 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

$$F = \tau \cdot S = \eta \cdot \frac{v}{h} \cdot S, \quad (N) \quad (1.1)$$

odtud získáme výraz pro tečné napětí, který se většinou píše v diferenciálním tvaru

$$\tau = \eta \cdot \frac{dv}{dy} = \eta \cdot j, \quad (Pa) \quad (1.2)$$

kde η (Pa/s) je dynamická viskozita a j (s^{-1}) je gradient rychlosti. Z této rovnice je patrné, že smykové napětí je úměrné dynamické viskozitě a gradientu rychlosti. Tato rovnice představuje Newtonův zákon viskozity. Tekutiny, které se řídí touto rovnicí se nazývají newtonské, takto se chovají všechny plyny i páry a mnoho běžných kapalin, především voda. Pokud chování kapalin nevyhovuje rovnici (1.2), jedná se o tekutiny nenewtonské, kam patří např. suspenze, vyšší polymery apod.

Z praktického hlediska byla zavedena tzv. kinematická viskozita definovaná výrazem

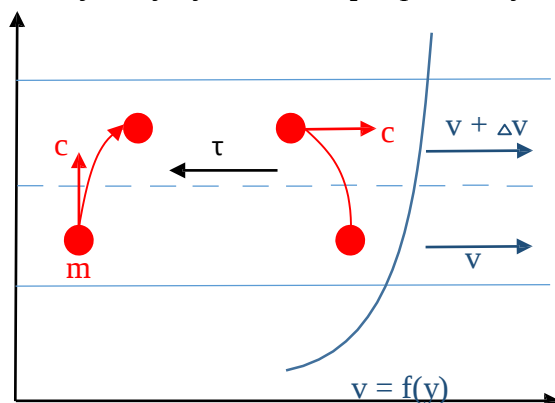
$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (m^2/s) \quad (1.3)$$

ρ (kg/m^3) představuje hustotu.

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.

1.1 Vznik viskozity při proudění

Při proudění tekutiny podle rovnice (1.2) v nejbližším okolí pohybujícího se povrchu, kde $y = h$, dostává tekutina určitou hybnost ve směru x . Tato tekutina zase předá část své hybnosti své sousední vrstvě tekutiny, takže i tato vrstva se pohybuje ve směru x . Hybnost se 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 . Viskózní hustota toku hybnosti stéká z oblasti velkých rychlostí do oblasti malých rychlostí podle obr. 1.1 (pohybuje se směrem klesající rychlosti tekutiny). Gradient rychlosti je tedy hybnou silou pro přenos hybnosti.



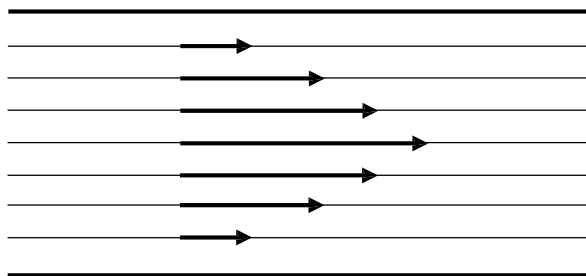
Obr. 1.2 Schéma vzniku smykového napětí v proudícím plynu

Vznik viskozity v proudícím plynu je možné vysvětlit takto: Předpokládejme, že ve 2D prostoru se plyn pohybuje ve směru x (obr. 1.2), při čemž jeho rychlost je závislá na souřadnici y . Vymeze v tomto prostoru pás tekutiny, jeho horní polovina se proti spodní polovině bude pohybovat rychleji, rozdíl rychlostí je Δv . 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. Předpokládejme tedy, 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.

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 plyne skutečnost, že v myšlené rovině vzniká smykové napětí.

1.2 Proudění reálné tekutiny

Při proudění reálných kapalin působí vždy proti vzájemnému posouvání částic kapaliny odporové síly zvané síly vnitřního tření (viskozita) které pohyb částic do jisté míry brzdí. Při proudění reálné kapaliny trubici není rychlost částic kapaliny v celém průřezu trubice stejná. Vrstva kapaliny, která se stýká bezprostředně se stěnami trubice, se pohybuje nejmenší rychlostí nebo je vzhledem ke stěnám trubice v klidu. Po této tzv. mezní vrstvě kapaliny se posouvá další vrstva, jejíž rychlost je již vzhledem ke stěnám trubice větší. Podobně se posouvají postupně větší a větší rychlostí další vrstvy kapaliny jedna po druhé. Největší rychlost mají pak částice kapaliny ve středu průřezu trubice. Vektory rychlostí jednotlivých vrstev můžeme vidět na obrázku 1.3.



Obr. 1.3 Vektory rychlostí jednotlivých vrstev

Hodnota dynamické viskozity u kapalin s rostoucí teplotou klesá, u plynů stoupá. Vzduch má asi stokrát menší viskozitu než voda. Podobně jako jsme zavedli veličinu vnitřní tření (mezi vrstvami tekutiny), můžeme zavést veličinu vnější tření (mezi stěnou nádoby a kapalinou). Na povrchu nádoby se kapalina téměř nepohybuje, koeficient vnějšího tření je velmi velký, prakticky nekonečný. Proto k němu nemusíme přihlížet. Víme, že rychlost proudění skutečné kapaliny je největší v ose trubice a nejmenší u stěn. Zavádíme tzv. střední rychlost proudu, tj. rychlost, jakou by měla tekutina tekoucí v celém průřezu stejnou rychlostí tak, že by za jednotku času protéklo průřezem trubice stejné množství kapaliny, jaké proteče ve skutečnosti. Pokud střední rychlost nepřekročí určitou hranici a při proudění jsou všechny proudnice rovnoběžné s osou trubice, je proudění laminární. Mezní hodnota závisí na viskozitě a na poloměru trubice. Klesá-li poloměr, mezní hodnota roste. Pro objem Q tekutiny, která projde za laminárního proudění trubicí, platí

$$Q = \frac{\pi \cdot \Delta p}{8 \cdot \eta \cdot l} \cdot r^4, \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (1.2.1)$$

Tento vztah se nazývá Poiseuilleův-Hagenův zákon. Množství tekutiny, jež projde kruhovým průřezem za jednotku času, je přímo úměrné tlakovému spádu, čtvrté mocnině poloměru trubice a je nepřímo úměrné dynamické viskozitě. Pro příliš velký tlakový spád (velká rychlost), proudění přestane být laminární a zákon neplatí. Důsledkem vnitřního tření je odpor, který kapaliny kladou pohybu tuhých těles. Rychlost tekutiny se v určitém bodě nepravidelně mění co do velikosti i směru, mluvíme pak o turbulentním proudění. Anglický fyzik Reynolds konal pokusy se skleněnými trubicemi různého průřezu při různém tlakovém spádu. Zjistil, že o druhu proudění rozhoduje bezrozměrná veličina Reynoldsovo číslo R , jež charakterizuje každý tok

$$R = \frac{d \cdot \rho \cdot v}{\eta}, \quad (-) \quad (1.2.2)$$

kde d (m) je délka charakteristického rozměru tělesa, ρ (kg/m^3) je hustota kapaliny, η (Pa/s) dynamická viskozita a v (m/s) je střední rychlost kapaliny. Podle pokusů laminární proudění v hladkých trubicích přechází v turbulentní tehdy, když Reynoldsovo číslo dosáhne kritické hodnoty R_k . ($R_k = 2320$)

Význam čísla R není omezen jen na proudění tekutin v trubicích, ale má základní význam pro proudění tekutiny v prostorech obecnějšího tvaru a při pohybu pevných těles v tekutinách. Stejně zákonitosti platí i pro vzduch, pokud je rychlost značně menší než rychlost zvuku. Při otáčivém pohybu tekutin následkem snadné posunutelnosti jejich částic a vnitřního tření nastávají jiné poměry než při otáčení pevného tělesa. Známým příkladem otáčivého pohybu tekutin jsou víry, které lze pozorovat např. nad výtakovým otvorem vany, kouřové kroužky ve vzduchu. Víry vznikají při proudění vlivem vnitřního tření, ve vrstvě, která odděluje dvě proudění různých rychlostí nebo víry vznikají za pevnými tělesy, která jsou v klidu nebo se pohybují (pilíře mostů). Víry představují útvar značné stability, jsou vázány na hmotu a na mezní vrstvu.

2. Měření viskozity

Pro měření viskozity tekutin se používá různých principů, podle kterých dělíme viskozimetry na kapilární, které využívají platnost Hagen – Poiseuilleova zákona při laminárním proudění v kruhovém potrubí (kapiláře). Kuličkové viskozimetry využívají Stokesův zákon při laminárním obtékání kuličky. Rotační viskozimetry mají dvě provedení, buďto se jedná o dva souosé válce, z nichž jeden stojí a druhý se otáčí (tzv. Couettovo proudění) nebo se také používá provedení s kuželem a deskou. Obvykle se kužel otáčí a deska stojí. Vibrační viskozimetry využívají tlumících schopností tekutiny jako důsledek její viskozity.

Tekutiny dělíme, jak již bylo uvedeno, na newtonské a neneutonské. Viskozita newtonských tekutin se měří snadněji, jelikož je to látkový parametr závislý na tlaku a teplotě. Pro stanovení viskozity těchto tekutin se dají použít všechny výše uvedené způsoby. K newtonským tekutinám patří také plyny, pro měření jejich viskozity jsou vhodné především viskozimetry kapilární případně kuličkové. Viskozita neneutonských kapalin není látkový parametr, musí se tedy měřit celé tokové křivky neboli reogramy. Zjišťování tokových křivek neneutonských kapalin je úloha obtížná, hlavně u suspenzí. Nejobtížnější je to u suspenzí nestabilních, tj. u takových, kde dochází k rozvrstvení během krátké doby, viskozita se u těchto suspenzí prakticky nedá měřit.

Pro měření viskozity a tokových křivek se používají přístroje zvané viskozimetry. Pro měření neneutonských kapalin se z mnoha známých vyráběných přístrojů hodí pouze takové, u nichž je geometrie toku jednoznačně definována a můžeme u nich určit hodnotu gradientu rychlosti j a jemu odpovídající hodnotu tečného napětí. Naopak nebudou vhodné takové přístroje, kde není měřeno laminární proudění, kde není definována geometrie toku a kde není možno přímo odečíst hodnoty tečného napětí a jemu odpovídající rychlost smykové deformace. Mezi vhodné přístroje tedy patří viskozimetry kapilární a viskozimetry rotační, za omezených podmínek se dají také použít viskozimetry kuličkové. Přístroje, které jsou k měření neneutonských kapalin nevhodné, jsou takové, kde se viskozita měří podle délky doby vytékání kapaliny otvorem nebo krátkou kapilárou. Sem patří například Englerův viskozimetr. Do skupiny nevhodných viskozimetrů patří také ty, které jsou založeny na Stokesově zákonu tj. Höpplerův viskozimetr využívající 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. Rotační a kapilární viskozimetr jsou tedy jediné vhodné pro zjišťování tokových křivek neneutonských kapalin. Avšak při měření suspenzí vykazují jisté potíže. Především se nedají použít pro nestabilní suspenze. Dalšími problémy jsou sedimentace pevných částic, která způsobuje nehomogenitu měření. Tento vliv se obvykle odstraňuje mícháním suspenze. U rotačních viskozimetrů je také problém odstředování částic suspenze. Měření, při nichž dochází k tomuto jevu se považují 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 nesnáze, která se nazývá skluzem u stěny, lze někdy odstranit změnou materiálu měřicího elementu. Někdy postačí úprava povrchu, tj. odmaštění, vychlazení nebo naopak zdrsnění stěn, které se suspenzí přichází do styku.

2.1 Kapilární viskozimetr

Měření viskozity pomocí kapilárního viskozimetru vychází, jak již bylo zmíněno, z Hagen-Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici kruhového průřezu. Podle tohoto zákona platí pro objemový průtok rovnice

$$Q_v = \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot v_s = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{p_z \cdot R^4}{\eta \cdot L}, \quad (\text{m}^3/\text{s})^3 \quad (2.1.1)$$

z této rovnice získáme vztah pro dynamickou viskozitu

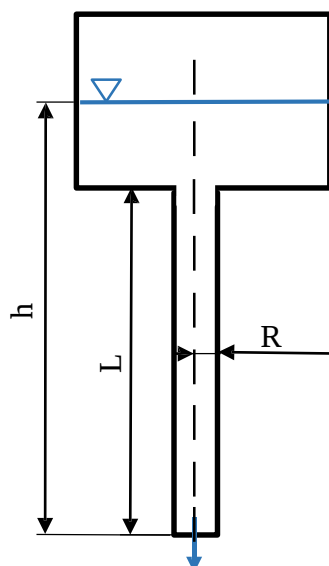
$$\eta = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{p_z \cdot R^4}{Q \cdot L} = \frac{\pi}{8} \cdot \frac{p_z \cdot R^4 \cdot \tau}{V \cdot L}, \quad (\text{Pa/s}) \quad (2.1.2)$$

kde R (m) průměr a L (m) délka kapiláry jsou známé parametry, p_z (Pa) je tlakový spád mezi začátkem a koncem kapiláry a Q (m^3/s) je průtočné množství. Dynamickou viskozitu je snadné z rovnice (2.1.2) dopočítat.

Nejčastěji se u kapilárních viskozimetrů používá provedení s konstantním spádem a měří se objemový průtok kapaliny. Tlakový spád p_z se v tomto případě vytváří sloupcem měřené kapaliny, jehož výška se mění v několika polohách. Tlakový spád lze také vytvořit tlakem inertního plynu na hladinu nebo prostřednictvím pístu, takovéto viskozimetry nazýváme výtlačné. Méně časté je provedení viskozimetrů s konstantním objemovým průtokem Q měřené kapaliny. Tyto přístroje jsou složitější, neboť vyžadují spolehlivé objemové dávkování.

Výtok měřené kapaliny z kapiláry viskozimetru může být provedeno buď tak, že kapalina vytéká do prostředí vyplněného kapalinou, tzv. Ostwaldovo provedení, nebo kapalina vytéká do volného prostoru, který je zvláštním otvorem spojen s atmosférou, toto provedení se nazývá Ubbelohdovo.

Nejdůležitějším místem těchto viskozimetrů je jejich kapilára a její vestavění do přístroje. Provedení těchto viskozimetrů může být různé, u některých je možné kapiláry o různých délkách a průměrech měnit. Tyto dva parametry je nutné znát pro měření. Pro přesná měření je také vhodné se přesvědčit o oválnosti a kuželovitosti kapilár. Kapilární viskozimetry patří do skupiny nejpřesnějších přístrojů a vedle měření newtonských kapalin jsou vhodné i pro měření tokových křivek nenewtonských kapalin.



Obr. 2.1 Schéma kapilárního viskozimetru

Pokles tlaku, měřitelný na kapilárním viskozimetru, nezpůsobují pouze smykové síly uvnitř kapiláry. V rozdílu tlaku se projevují také různé energetické změny, které jsou sice nežádoucí, ale v praxi se nedají úplně vyloučit. Mezi tyto změny patří zejména změny kinetické energie kapaliny v důsledku změny rychlosti při vstupu do kapiláry a přídavné tření ve vstupním a výstupním otvoru. Mezi další rušivé elementy patří také povrchové síly, jejich vliv se dá spolehlivě eliminovat vhodnou konstrukcí viskozimetru. Při některých měřeních je třeba přihlížet i ke změnám tlaku a k teplu vyvinutém 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.

Ze všech těchto jmenovaných vlivů na přesnost měření má největší váhu změna kinetické energie kapaliny, proto je vhodné tento vliv korigovat. Toto se provádí tak, že se vliv změny kinetické energie vyjádří početně v rovnici (1.7), nebo se použije při měření kalibrovaných kapilár kapalina o známé viskozitě. Také se může zvýšit velikost tlaku v nádobce viskozimetru tak, aby jmenované změny byly zanedbatelné proti tlakové ztrátě třením v kapiláře, nebo se použije dostatečně dlouhá kapilára.

K výpočtu korekcí vyjdeme z Bernoulliho rovnice. Za předpokladu, že rychlost na hladině nádoby je nulová a pro tlakovou diferenci platí $\Delta p = p_1 - p_2$, potom vztah pro tlakovou ztrátu je

$$\begin{aligned} p_z &= \Delta p + \rho \cdot g \cdot h - m \cdot \frac{v_z^2}{2} \cdot \rho = \\ &= \Delta p + \rho \cdot g \cdot h - m \cdot \frac{Q_v^2}{\pi^2 \cdot R^2} \cdot \rho, \end{aligned} \quad (\text{Pa}) \quad (2.1.3)$$

kde m (-) je součinitel vyjadřující velikost změny kinetické energie jeho hodnota se získá ocejchováním viskozimetru.

Vliv místní ztráty v okolí vtoku a výtoku se vyjádří pomocí ekvivalentní délky kapiláry, která se stanoví takto

$$L_{ek} = k \cdot R, \quad (\text{m}) \quad (2.1.4)$$

takže celková délka je

$$L_c = L + L_{ek}, \quad (\text{m}) \quad (2.1.5)$$

S použitím těchto rovnic dostaneme vztah pro dynamickou viskozitu

$$\eta = \frac{\pi \cdot (\Delta p + \rho \cdot g \cdot h) \cdot R^4}{8 \cdot Q_v \cdot (L + k \cdot R)} - \frac{m \cdot \rho \cdot Q_v}{8 \cdot \pi \cdot (L + k \cdot R) \cdot \tau}, \quad (\text{Pa/s}) \quad (2.1.6)$$

a vztah pro kinematickou viskozitu

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = A \cdot \tau - \frac{B}{\tau}, \quad (\text{mm}^2/\text{s}) \quad (2.1.7)$$

kde A (-) je kalibrační konstanta, B (-) je tzv. korekce na kinetickou energii a τ (s) je doba výtoku kapaliny z viskozimetru. Konstanty A a B se snadno určí kalibrací s kapalinou o známé viskozitě.

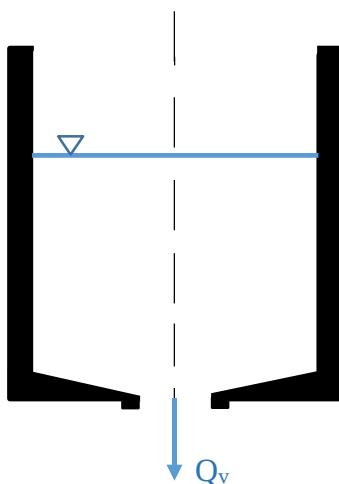
2.2 Výtokový viskozimetr

Výtokové viskozimetry vychází stejně jako kapilární z Hagen-Poiseuilleova zákona pro laminární proudění tekutiny v trubici kruhového průřezu. Jelikož délka kapiláry je v poměru k jejímu průměru krátká, velká část tlakové a polohové energie se spotřebuje na krytí ztrát vtokem a výtokem, na kinetickou energii a také na vytvoření parabolického rychlostního profilu v trubici. Dráha potřebná k rozběhu kapaliny při laminárním proudění je dána empirickou rovnicí

$$\frac{x}{d} = 0,065 \cdot Re, \quad (-) \quad (2.2.1)$$

kde x (mm) je délka kapiláry, d (mm) je její průměr, Re (-) je Reynoldsovo číslo.

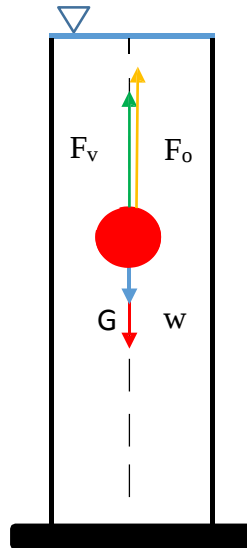
Početně je obtížné tuto energii stanovit, proto se u těchto viskozimetrů postupuje tak, že se změří doba výtoku předem definovaného objemu kapaliny při zvolené teplotě a pak se změří doba výtoku stejného objemu opět při zvolené teplotě. Viskozita se pak stanoví relativně jako poměr těchto dvou naměřených časů. Konstrukce těchto viskozimetrů je taková, že se výtok měřené kapaliny uskuteční tlakem pístu nebo plynu na hladinu kapaliny ve viskozimetru. Nejčastěji se však výtok uskuteční vlastní tíhou kapaliny.



Obr. 2.2 Schéma výtokového viskozimetru

2.3 Tělískový viskozimetr

Tělískové viskozimetry jsou založeny na rychlosti pádu tělíska v měřené tekutině. Nejčastěji se jako měřicí tělísko používá hladká koule. Předpokládáme, že koule o průměru d a hustotě ρ_k se pohybuje ustálenou rychlostí w způsobenou vlastní tíhou v kapalině. Tato rychlost se označuje jako sedimentační nebo pádová. Kapalina ve viskozimetru má hustotu ρ_v a dynamickou viskozitu η . Na pohybující se kouli působí tíhová síla G , vztlaková síla F_v a odporová síla F_o , protože se předpokládá rovnoměrná pádová rychlost je setrvačná síla nulová viz. obr. 2.3.



Obr. 2.3 Rovnováha sil při pohybu koule ve viskozimetru

Pro rovnováhu sil působících na kuličku platí

$$G = F_v + F_o, \quad (\text{m/s}^2) \quad (2.3.1)$$

kde

$$G = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \cdot \rho_k, \quad (\text{N}) \quad (2.3.2)$$

$$F_v = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \cdot \rho_v, \quad (\text{N}) \quad (2.3.3)$$

$$F_o = c_x \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_v, \quad (\text{N}) \quad (2.3.4)$$

a po dosazení za jednotlivé síly dostaneme

$$\frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \cdot \rho_k = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot g \cdot \rho_v + c_x \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \frac{w^2}{2} \cdot \rho_v \quad (2.3.5)$$

Odkud získáme vztah pro pádovou rychlost

$$w = \sqrt{\frac{4 \cdot d \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot g}{3 \cdot c_x \cdot \rho_v}}, \quad (\text{m/s}) \quad (2.3.6)$$

Jako další musíme definovat Reynoldsovo číslo sedimentace

$$Re = \frac{w \cdot d \cdot \rho_k}{\eta}, \quad (-) \quad (2.3.7)$$

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

$$c_x = \frac{24}{Re}, \quad (-) \quad (3.3.8)$$

Po dosazení posledních dvou rovnic do vztahu pro odporovou sílu (2.3.4) získáme vztah, který bývá označován jako Stokesův zákon.

$$F_o = 6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r \cdot w = 3 \cdot \pi \cdot \eta \cdot d \cdot w \quad (N) \quad (2.3.9)$$

Z rovnic (2.3.5) a (2.3.9) získáme po drobných úpravách rovnicí pro dynamickou viskozitu

$$\eta = \frac{d^2 \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot g}{18 \cdot w} = \frac{2 \cdot r^2 \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot g}{9 \cdot w}, \quad (Pa/s) \quad (2.3.10)$$

Budeme-li však měřit pádovou rychlost kuličky jako proběhnutou dráhu L za čas τ , potom se rovnice (2.3.10) upraví na tvar

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{d^2 \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot g}{18 \cdot L} \cdot \tau = \frac{2 \cdot r^2 \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot g}{9 \cdot L} \cdot \tau = \\ &= k \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot \tau \end{aligned} \quad (Pa/s) \quad (2.3.11)$$

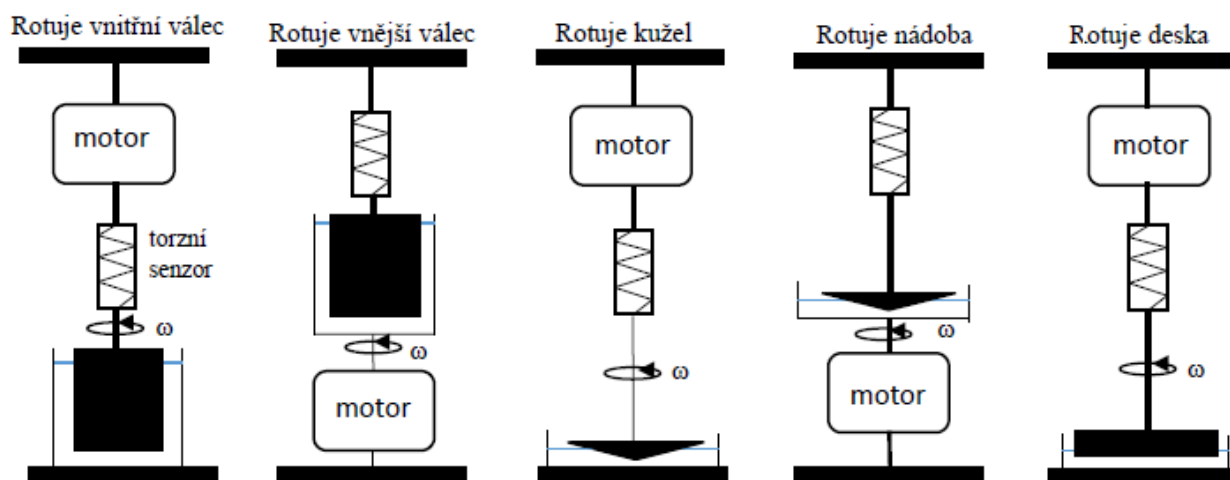
Z této rovnice můžeme vypočítat hodnotu dynamické viskozity měřené tekutiny za předpokladu, že měříme čas potřebný pro proběhnutí kuličky na dráze L . Písmenko k (-) značí konstantu viskozimetru.

2.3.1 Stokesův viskozimetr

Stokesův viskozimetr patří mezi nejjednodušší tělískové viskozimetry. V podstatě se jedná o skleněný válec naplněný námi měřenou kapalinou na němž jsou vyznačené dvě rysky. Vzdálenost mezi ryskami je L , stopkami se změří čas průchodu kuličky mezi těmito ryskami a z rovnice (3.3) se pro známou hustotu kuličky a měřené kapaliny vypočítá velikost dynamické viskozity. Viskozimetr je možné vhodně temperovat a měřit tak závislost dynamické viskozity na teplotě. U Stokesova viskozimetru je nutné dodržet podmínku, že průměr kuličky je výrazně menší než průměr válce.

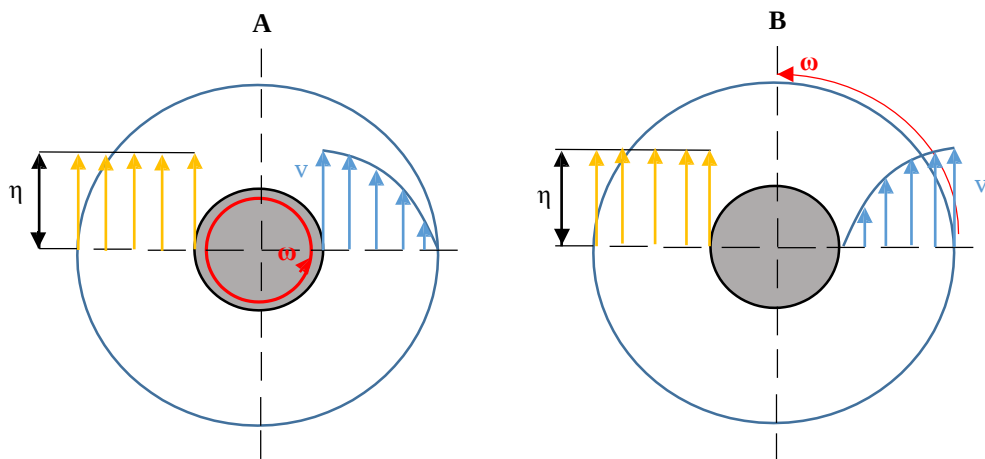
2.4 Rotační viskozimetr

Rotační viskozimetry měří viskozitu pomocí dvou souosých válců, otáčejících se navzájem kolem společné osy. Touto konstrukcí se viskozimetry přiblížily k pomyslnému pokusu o stanovení viskozity mezi dvěma nekonečnými rovnoběžnými plochami. Přímě měřitelnými veličinami u rotačních viskozimetrů je úhlová rychlost ω nebo počet otáček za čas ustáleného pohybu jednoho z válců nebo také krouticí moment, který se projevuje v důsledku odporu kapaliny proti smykovému namáhání při vzniku gradientu rychlosti. Krouticí moment brání proti pohybu jednomu z válců. Rotační viskozimetry se používají v nejrůznějších provedení avšak nejčastější jsou provedení dva souosé válce nebo kužel, nebo dvě rotující desky viz. obr. 2.4



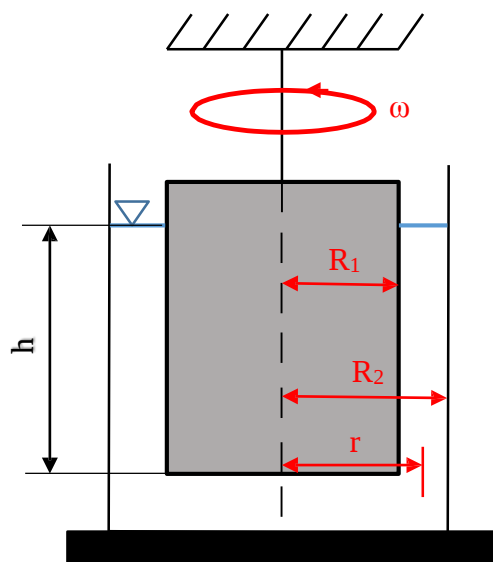
Obr. 2.4 Schématické znázornění rotačních viskozimetrů

U rotačních viskozimetrů se souosými rotujícími válci existují dvě provedení, buď se otáčí vnitřní válec a jedná se o Couettovo proudění (obr. 2.5A), nebo rotuje vnější válec a jedná se o tzv. systém Saerle (obr. 2.5B). V podstatě však u těchto viskozimetrů nezáleží, který z obou válců se otáčí, neboť pro vlastní výpočet stačí uvažovat jen relativní rychlost obou válců. Častěji se používá provedení s rotujícím vnitřním válcem.



Obr. 2.5 Rychlostní profil mezi rotujícími válci

V současné době existuje celá řada různých konstrukcí rotačních viskozimetrů, které se od sebe liší především provedením pohonu, otáčejícího se tělesa (válce, kuželu nebo desky) a způsobem měření krouticího momentu.



Obr. 2.6 Schéma válce rotačního viskozimetru

Pro odvození rovnice rotačního viskozimetru nejprve definujeme poměr vnějšího a vnitřního válce podle obr. 2.6

$$\delta = \frac{R_2}{R_1}, \quad (-) \quad (2.4.1)$$

kde R_1 (mm) je poloměr vnitřního a R_2 (mm) vnějšího válce. Poměr δ se obvykle volí v intervalu $1 \leq \delta \leq 1,1$.

Pro krouticí moment, který se u rotačních viskozimetrů využívá k měření viskozity, platí obecný vztah

$$M = 2 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot h \cdot \tau, \quad (\text{Nm}) \quad (2.4.2)$$

rovnici pro obvodovou rychlost ω získáme odvozením z rovnice (2.4.2) a následnou integrací přes celou mezeru mezi vnitřním a vnějším válcem.

$$\omega = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot h \cdot \eta} \cdot \frac{R_2^2 - R_1^2}{R_1^2 \cdot R_2^2}, \quad (\text{min}^{-1}) \quad (2.4.3)$$

Z této rovnice pak můžeme vypočítat krouticí moment M nebo dynamickou viskozitu η . Jelikož jsou všechny veličiny kromě krouticího momentu a dynamické viskozity konstantní, můžeme výpočet zjednodušit a rovnice pak vypadá takto

$$\eta = k \cdot \frac{M}{\omega}, \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (2.4.4)$$

kde k (-) je konstanta viskozimetru.

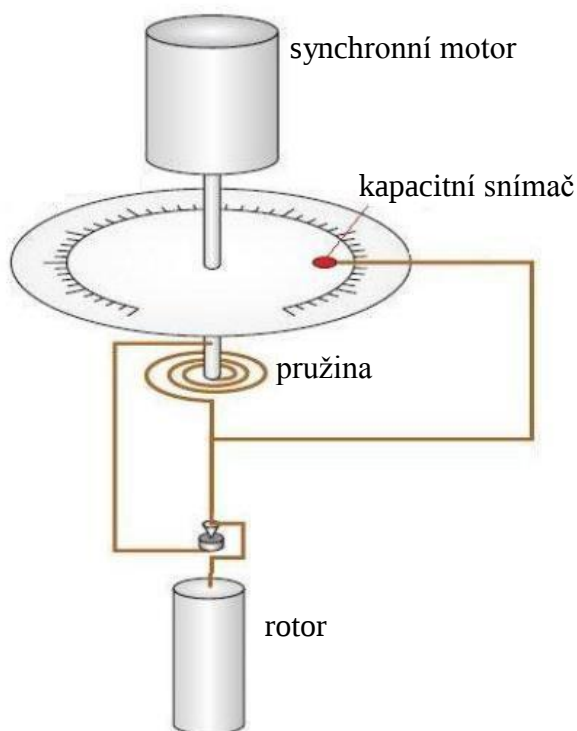
Pro měření viskozity se tedy většinou měří velikost krouticího momentu, buď pomocí pružiny nebo snímačem a AD převodníkem který převádí naměřený krouticí moment do počítače.

Nevýhodou rotačních viskozimetrů bývá skutečnost, že na krouticím momentu se uplatňují i tzv. koncové efekty. V rovnici (2.4.3) předpokládáme, že třecí síla působí pouze na válcové plochy vnitřního a vnějšího válce. Ve skutečnosti zde působí i tření mezi válcem a dnem nebo víkem. Tomuto tření se většinou nedá zabránit, takže výsledný krouticí moment bývá z části způsobován i řadou jiných často těžko definovatelných třecích sil. Ve snaze zabránit těmto negativním vlivům bylo navrženo několik empirických metod a také byly navrženy konstrukční úpravy rotačních válců. Mezi další nevýhodu se řadí vzrůst teploty měřeného vzorku vlivem tření. S rostoucí teplotou klesá krouticí moment a tím i viskozita. S rostoucími otáčkami je tento vliv větší a je nutné chladit vzorek.

2.4.1 Rotační viskozimetr Rheotest

Rotační viskozimetr Rheotest se řadí mezi viskozimetry, které k měření viskozity využívají pootočení válce. Měřená kapalina se nachází v prstencové mezeře sousedního válcového systému. Vnější válec o poloměru R je vytvořen jako měřicí nádoba, ve které se nachází měřená látka spolu s otáčejícím se válcem o poloměru r a délce L . Abychom mohli měřit závislost viskozity na teplotě, je vnější válec umístěn v temperovací nádobě, ke které je připojen kapalinový cirkulační termostat.

Vnitřní kužel je připojen ke hřídeli, která je opatřena válcovou šroubovitou pružinou. Pootočení této pružiny je mírou přenášeného krouticího momentu M , díky kterému lze spočítat hodnotu viskozity. Natočení pružného členu je snímáno odporovým potenciometrickým snímačem.



Obr. 2.7 Schéma měření krouticího momentu

Vedle viskozimetrů se snímáním pomocí snímače, existují ještě s AD převodníky, které používají precizní servo motory k pohonu a pružinu nahrazují rychloupínací spojky. Smykové napětí a smykový spád lze u těchto viskozimetrů přesně spočítat.

$$\tau = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot r^2} = Z \cdot \alpha, \quad (\text{Pa}) \quad (2.4.5)$$

Kde Z (-) je konstanta vnitřního otáčejícího se válce zjištěná kalibrací a α (-) velikost dílků stupnice odečtená na indikačním přístroji. U rotačního viskozimetru Rheotest lze kombinovat 5 měřicích zařízení (válců o různých rozměrech). Válce využíváme v závislosti na tom, jakou viskozitu měříme. (malou, střední či velkou).

2.4.2 Úloha měření viskozity pomocí rotačního viskozimetru Rheotest

Zadání Stanovte viskozitu přiloženého vzorku a její závislost na teplotě pomocí rotačního viskozimetru Rheotest 2.

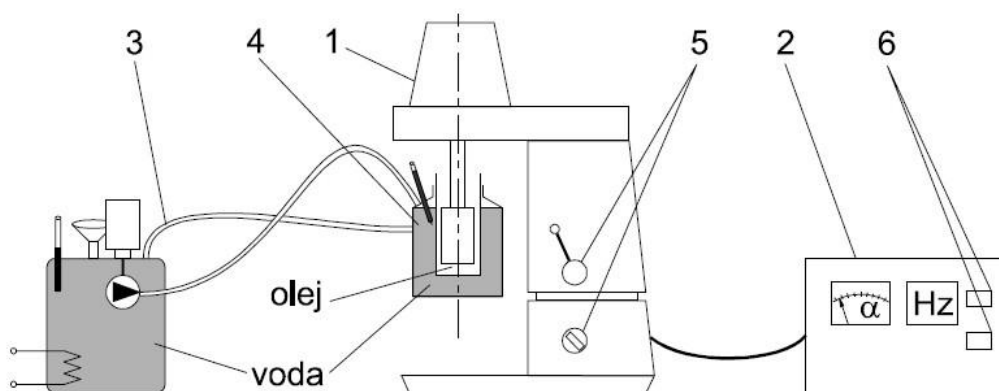
Všeobecně Rotační viskozimetr Rheotest je přístroj zkoumající reologické vlastnosti látky pomocí měřicího zařízení s Searle-válci. V tomto zařízení se s válci se měřená látka nachází v prstencové mezeře koaxiálního válcového systému. Vnější pevný válec o poloměru R je vytvořen jako měřicí nádoba pojímající látku a je za účelem temperování měřené látky uložen v temperovací nádobě. K této nádobě je připojen kapalinový cirkulační termostat. Hřídel na který je připojen vnitřní válec je opatřen válcovou šroubovitou pružinou, jejíž natočení je mírou přenášeného krouticího momentu M na vnitřní válec o poloměru r a délce L otáčející se konstantní úhlovou rychlostí ω . Natočení pružného členu je snímáno odporovým potenciometrickým snímačem, který je součástí můstkového zapojení. Smykové napětí τ_r a smykový spád D_r lze pro koaxiální válcový systém přesně vypočítat.

$$\tau_r = \frac{M}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot r^2} = Z \cdot \alpha \quad (\text{Pa}) \quad (2.4.6)$$

$$D_r = \frac{2 \cdot \pi \cdot R^2}{R^2 - r^2} \quad (\text{s}^{-1}) \quad (2.4.7)$$

kde Z je konstanta válce zjištěná kalibrací,
 α velikost dílků stupnice odečtená na indikačním přístroji.

**Schéma
zapojení**



**Použité
přístroje**

1. viskozimetr
2. indikační přístroj pro dílky α
3. termostat
4. nádoba s rotujícím valem v měřené látce
5. nastavení otáček
6. zapínání rotace válce a stupnice α

Postup měření

Měřicí zařízení s válcem a měřenou kapalinou je upevněno v přístroji viskozimetru a vloženo do temperovací nádoby, K ní je připojen termostat s vodní náplní. Na viskozimetru jsou nastaveny potřebné otáčky a rozsah smykového napětí.

- Na indikačním přístroji viskozimetru (2) stlačením obou tlačítek uvedeme zařízení v činnost a zapneme termostat.
- Měříme 5 hodnot viskozity pro ohřátí vzorku o $\Delta T = 2 \text{ K} - 5 \text{ K}$. Pro danou teplotu měřené látky odečteme dílky stupnice a zaznamenáme je do tabulky.
- Provedeme výpočet dynamické viskozity a přepočítáme ji na kinematickou.
- Znázorníme do grafu závislost viskozity na teplotě.

Výpočtové vztahy

Smykové napětí τ_r je přímo úměrné výchylce α

$$\tau_r = Z \cdot \alpha, \quad (\text{Pa}) \quad (1)$$

kde $Z = 0,51$ je konstanta válce zjištěná kalibrací.

Dynamická viskozita μ je podíl

$$\mu = \frac{\tau_r}{D_r}, \quad (\text{Pa} \cdot \text{s}) \quad (2)$$

kde D_r (1/s) je smykový spád.

Kinematická viskozita ν je podíl dynamické viskozity a hustoty oleje

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (3)$$

kde hustotu ρ (kg/m^3) získáme změřením pomocí přenosného hustoměru DMA 35

nastavená poloha otáček			(1)
otáčky	n		(1/min)
rozsah viskozity			(1)
smykový spád	D_r		(1/s)

Tabulka naměřených hodnot

číslo měření	teplota ($^{\circ}\text{C}$)	dílky	dynamická viskozita ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)	kinematická viskozita (m^2/s)
1				
2				
3				
4				
5				

Závěr

Jak závisí viskozita vzorku na teplotě?

2.5 Vibrační viskozimetr

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

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2 \cdot b \cdot \frac{dy}{dt} + \omega_0 \cdot y = 0 \quad (2.5.1)$$

Pro vynucené tlumené kmitání platí podobná rovnice

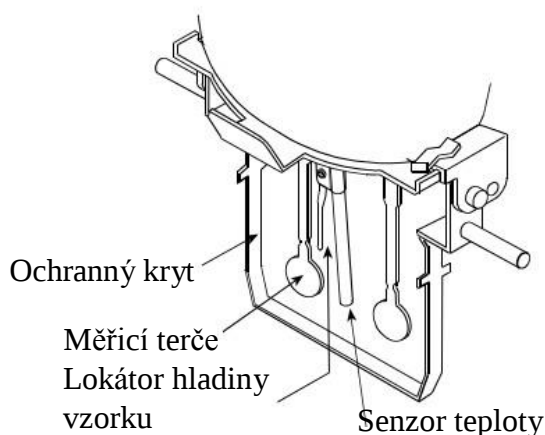
$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2 \cdot b \cdot \frac{dy}{dt} + \omega_0 \cdot y = \frac{F}{m} \cdot \sin \omega \cdot t \quad (2.5.2)$$

V těchto rovnicích vystupuje součinitel tlumení b , který je při laminárním proudění lineární funkcí kinematické viskozity. Vibrační viskozimetry používají k měření vibrující tělísko, které koná torzní nebo příčné kmity jako například ladička. Viskozitu lze měřit třemi způsoby, buďto měříme příkon pro oscilaci s konstantní amplitudou a frekvencí, dobu útlumu po vypnutí přístroje nebo se měří rezonanční frekvence. Vibrační viskozimetr SV-10 je založen na měření útlumu dvou kmitajících kruhových terčů. Tato metoda umožňuje vysokou přesnost a široký rozsah měření bez nutnosti výměny snímacích částí přístroje. Viskozita je měřena nepřímým 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 kalibrovat kapalinou známé viskozity, postačí jednobodová nebo dvoubodová kalibrace. Přístroj je vhodný i pro měření nenewtonských kapalin, pěnových a pěnivých vzorků, koloidních roztoků, měření tekoucích vzorků včetně tekutin při turbulentním proudění. Pro měření stačí přibližně 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 10 Pa·s



Obr. 2.9 Vibrační viskozimetr SV-10

Viskozimetr samotný se skládá pouze z hlavní měřicí jednotky a zobrazovací jednotky. Měřicí jednotka dále ze stolku, který má otočné nohy k uvedení přístroje do vodorovné polohy. Opěrného stojánu, na kterém lze pohybovat měřicí sondou nahoru a dolů. Aby se zabránilo samovolnému posunu je nutné vždy přístroj za aretovat pomocí páčky. Měřený vzorek je umístěn v plastové nádobce, která je přidělaná ke stolku držáky. Stolkem lze také posouvat ve svislém směru.



Obr. 2.10 Detail měřicí jednotky viskozimetru

Na obrázku 2.6.2 můžeme vidět detail měřicí jednotky, při našem měření jsme nepoužili ochranný kryt, protože bychom pak nemohli použít nádobku na vzorky, ve které lze tekutinu ohřívat. Všechny části viskozimetru, které se dostávají do kontaktu s měřenou látkou, jsou pozlacené pro zvýšení odolnosti proti naleptání nebo narušení povrchu kapalinami. Senzor nebo také lokátor hladiny nám pouze pomáhá ponořit měřicí terče do optimální hloubky vzorku. Špička lokátoru by se měla dotýkat hladiny.

2.5.1 Kalibrace viskozimetru SV-10

Jelikož byl přístroj nový, bylo nutné před měřením provést jeho kalibraci. Přístroj SV-10 nám nabízí tři možnosti kalibrace a to jednobodovou, dvoubodovou nebo zjednodušenou kalibraci pomocí destilované vody. Jednobodová kalibrace je založena na kalibraci jedné hodnoty v celkovém rozsahu. Tato metoda je vhodná pouze pro úzký rozsah měření viskozity v oblasti hodnoty kalibrace. Dvoubodová kalibrace se naopak používá pro měření viskozity v širokém rozsahu. My jsme použili zjednodušenou kalibraci pomocí destilované vody. Výhoda této metody spočívá v uložení teplotní závislosti vody v zařízení. To znamená, že jsme schopni přístroj kalibrovat při jakékoliv teplotě. Nevýhoda je, že se jedná pouze o jednobodovou kalibraci v oblasti kolem $1\text{ mPa}\cdot\text{s}$. Při kalibraci si musíme dávat pozor na přesné dodržení teploty, velký důraz je také kladen na správné nastavení úrovně hladiny. Nesprávně nastavená hladina o 1 mm má za důsledek rozdíl v naměřených hodnotách viskozity o 5% . Kalibraci je vhodné provádět před každým měřením.

2.5.2 Zjednodušená kalibrace

Na zobrazovací jednotce zmáčkne tlačítko ON:OFF, kterým zapneme viskozimetr. Pokud chceme provést jednobodovou kalibraci pomocí destilované vody umístíme vodu do nádoby po vyznačenou rysku, do vody ponoříme měřící terče a zmáčkne tlačítko START. Nyní počkáme než se nám hodnota viskozity a teploty ustálí a znovu zmáčkne a podržíme tlačítko START. Na displeji se zobrazí teoretická viskozita destilované vody při naměřené teplotě. Hodnoty blikají, pokud chceme kalibraci zrušit zmáčkne tlačítko STOP. Přístroj se vrátí do stavu před kalibrací. Zmáčknutí tlačítka START provedeme kalibraci. Při správném provedení se zobrazí nápis END.

2.5.3 Úloha měření viskozity pomocí vibračního viskozimetru SV-10

Zadání Změřte dynamickou viskozitu technického hydraulického oleje a určete její závislost na teplotě pomocí vibračního viskozimetru SV 10.

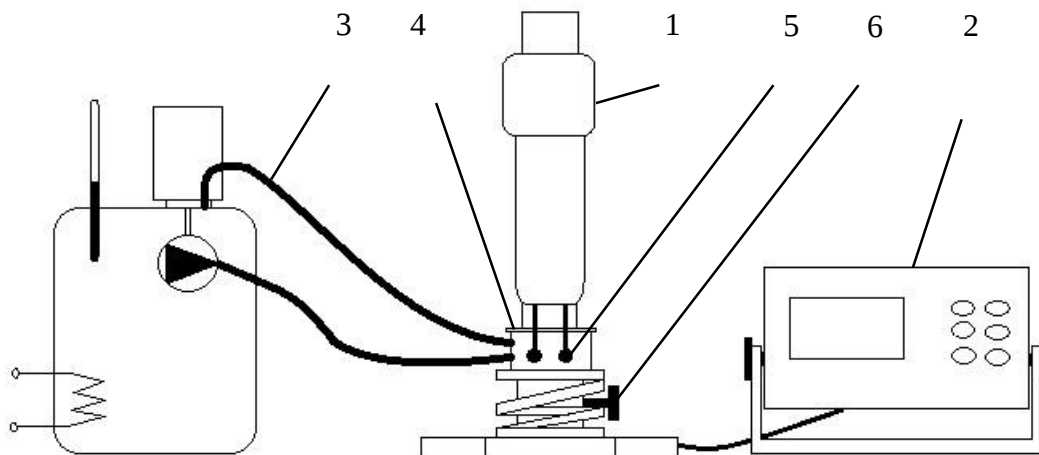
Všeobecně Viskozita neboli vazkost, je fyzikální veličina, která udává poměr mezi tečným napětím

$$\tau = \eta \frac{dv}{dy} \quad (\text{Pa}) \quad (1)$$

a změnou rychlosti v závislosti na vzdálenosti mezi sousedními vrstvami při proudění skutečné kapaliny. Viskozita je veličina charakterizující vnitřní tření a závisí především na přitažlivých silách mezi částicemi. Kapaliny s větší přitažlivou silou mají větší viskozitu, větší viskozita znamená větší brzdění pohybu kapaliny nebo těles v kapalině. Pro ideální kapalinu má viskozita nulovou hodnotu. Kapaliny s nenulovou viskozitou se označují jako viskózní (vazké).

Tlumících schopností tekutiny jako důsledek její viskozity využívá vibrační viskozimetr SV 10 k jejímu měření. Přístroj měří velikost sinusového budícího elektrického proudu potřebného pro rezonanci dvou kruhových terčů na konstantní frekvenci 30 Hz s amplitudou nižší než 1 mm. Výpočet dynamické viskozity je prováděn automaticky a její hodnota se nám zobrazuje na displeji zobrazovací jednotky.

**Schéma
zapojení**



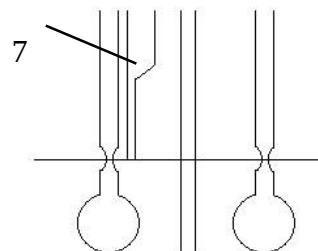
Použité přístroje

1. viskozimetr
2. zobrazovací jednotka
3. termostat
4. nádobka se vzorkem
5. snímací destičky
6. polohovací šroub

Postup měření

Nádobka s měřeným hydraulickým olejem je upevněna na stolku viskozimetru pomocí vodících lišt. K ní je připojen termostat s vodní náplní.

- a) Otáčením polohovacího šroubu (6.) nastavíme hladinu vzorku tak, aby protínala střed úzké části snímacích destiček a průměrná polohová deska (7.) se jí dotýkala svou špičkou.
- b) Na zobrazovací jednotce (2.) stiskneme tlačítko ON:OFF, aby došlo k zapnutí přístroje a také zapneme termostat.
- c) Viskozitu změříme vždy při ohřátí vzorku o $\Delta t = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření provádíme tak, že 0,2 $^{\circ}\text{C}$ před danou teplotou stiskneme tlačítko START na zobrazovací jednotce a současně vypneme termostat z důvodu snížení rušivých vibrací při měření. Takto změříme viskozitu pro 10 různých hodnot teploty.
- d) Po odečtení dynamické viskozity při dané teplotě opět zapneme termostat a stiskneme 2x tlačítko STOP na zobrazovací jednotce. Kroky c) a d) zopakujeme ještě 9x. Získané hodnoty dynamické viskozity zaznamenáme do tabulky.
- e) Provedeme výpočet kinematické viskozity.
- f) Znázorníme do grafu závislost viskozity na teplotě.

**Po použití**

Odstraníme veškeré zbytky vzorku ze snímacích destiček a snímače teploty pomocí rozpouštědel. Snímací destičky čistíme opatrně, aby nedošlo k jejich ohnutí. Uchopíme snímací destičku papírovým kapesníkem a pohybujeme jím směrem dolů, abychom odstranili vzorek. Poté ho navlhčíme rozpouštědlem a odstraníme zbytky vzorku.

Výpočtový vztah

Kinematická viskozita ν je podíl dynamické viskozity a měrné hmotnosti oleje.

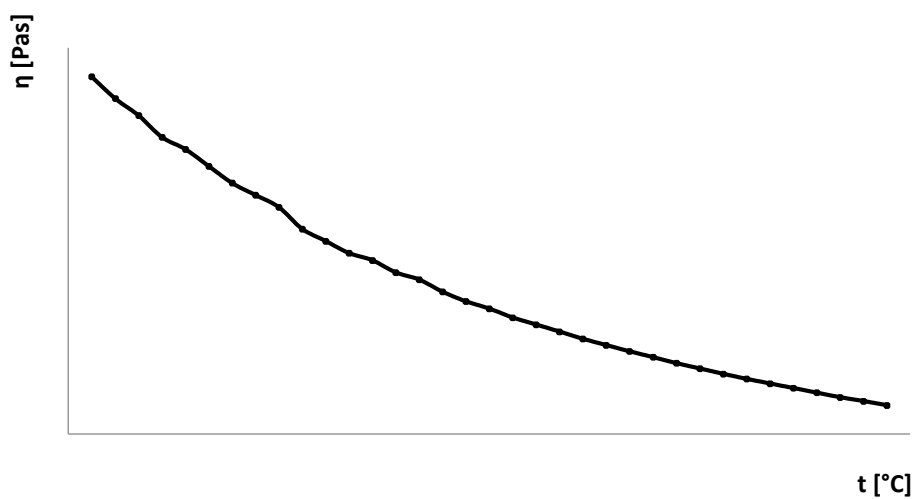
$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2)$$

kde měrnou hmotnost oleje získáme pomocí hustoměru DMA 35. (viz. úloha měření hustoty)

**Tabulka
naměřených a
vypočítaných
hodnot**

číslo měření	teplota [°C]	dynamická viskozita η [mPa.s]	kinematická viskozita ν [m ² /s]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

**Graf
závislosti
viskozity na
teplotě**



Závěr

Jak závisí viskozita měřeného oleje na teplotě?

3. Hustota a její měření

Hustota představuje hodnotu dané veličiny vztažené k jednotkovému objemu, jednotkovému obsahu plochy nebo jednotkové délce, nás bude nejvíce zajímat měrná hmotnost a její závislost na teplotě. Při ohřívání kapalin dochází ke zrychlování pohybu jejich molekul, zvětšují se mezimolekulární vzdálenosti a tím se také zvětšuje objem kapalin. Tato vlastnost se využívá u kapalinových teploměrů. Protože platí vztah pro hustotu

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (\text{kg/m}^3) \quad (3.1)$$

kde hmotnost m (kg) se nemění a objem V (m^3) se zvětšuje, pak dochází při ohřevu kapaliny k poklesu její hustoty.

3.1 Přenosný hustoměr DMA 35

DMA 35 je měřicí přenosný přístroj pro stanovení hustoty kapalin, který pracuje na principu oscilující trubice ve tvaru U. Vedle hustoty lze získat i další měřené veličiny jako relativní hustotu, hustotu kompenzovanou na teplotu nebo koncentraci. Teplota vzorku se měří přímo v měřicí cele zabudovaným snímačem teploty a její hodnota se zobrazuje na displeji. S přístrojem se manipuluje snadno díky jeho nízké hmotnosti. Výsledky jsou přehledně čitelné na podsvíceném displeji, podsvícená je také U trubice takže můžeme vidět zda je dostatečně zaplněná vzorkem. Plnění vzorku se provádí pomocí nasávací pumpičky. DMA 35 se snadno obsluhuje pomocí sedmi tlačítek. Hustoměr má svou vnitřní paměť a je schopen uložit až 1024 naměřených dat.

3.1.1 Princip měření hustoty hustoměrem DMA 35

Vzorek se naplní do trubice z borosilikátového skla ve tvaru U, která je pomocí elektromagnetů rozkmitána na svou rezonanční frekvenci. Tato frekvence se mění v závislosti na hustotě naplněného vzorku. Měřením rezonanční frekvence je možné vypočítat hustotu. Vzhledem k závislosti hustoty vzorku na teplotě se musí přesně změřit teplota vzorku.



Obr. 3.1 Přenosný hustoměr DMA 35

3.2 Úloha měření hustoty přenosným hustoměrem DMA 35

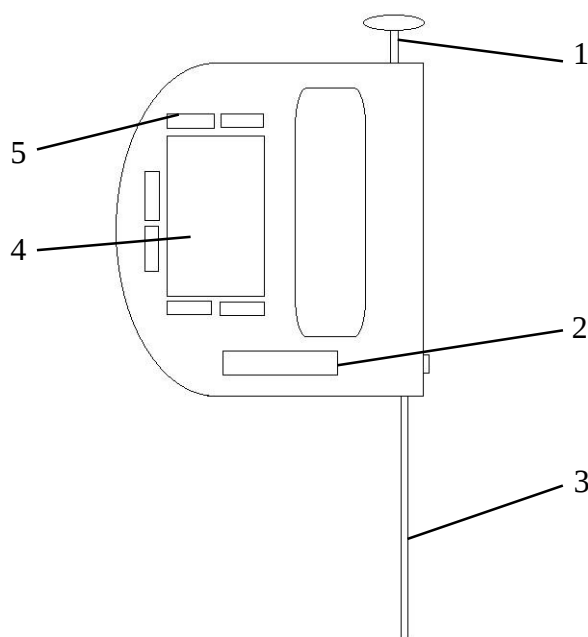
Zadání Změřte měrnou hmotnost technického oleje a určete její závislost na teplotě pomocí hustoměru DMA 35.

Všeobecně Hustota neboli měrná hmotnost je fyzikální veličina, která definuje podíl hmotnosti m a objemu V tělesa, tedy

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (\text{kg/m}^3) \quad (1)$$

Popis přístroje DMA 35 je přenosný měřicí přístroj pro stanovení hustoty kapalin, který pracuje na principu oscilující U-trubice. Vedle hustoty jsou k dispozici i další měřené veličiny (např. teplota). Teplota vzorku se měří přímo v měřicí cele zabudovaným snímačem teploty a zobrazuje se na displeji. Vzorek se naplní do trubice z borosilikátového skla ve tvaru U, která je pomocí elektromagnetů rozkmitána na svou rezonanční frekvenci. Tato frekvence se mění v závislosti na hustotě naplněného vzorku. Měřením této frekvence je možné vypočítat hustotu. Vzhledem k závislosti hustoty na teplotě se musí přesně změřit teplota vzorku

Schéma přístroje



1. nasávací pumpička
2. měřicí cela
3. nasávací trubička
4. LCD displej
5. ovládací tlačítka

Postup měření

- a) Zapneme přístroj pomocí ovládacího tlačítka (5).
- b) Stiskneme píst nasávací pumpičky (1).
- c) Ponoříme nasávací trubičku (3) do měřeného vzorku.
- d) Pomalu uvolníme píst.
- e) Naměřená hustota spolu s teplotou vzorku se zobrazí na displeji (4).
- f) Měřicí celu vyplněnou měřeným vzorkem vyprázdníme stisknutím pumpičky
- g) Měření provedeme pro 5 různých hodnot teploty vzorku.
- h) Znázorníme do grafu závislost hustoty na teplotě.

Po použití

Vypneme přístroj pomocí ovládacího tlačítka (5) a provedeme kroky b), c), d) a f) s tím rozdílem že nasáváme čistící roztok. Opakujeme do té doby než je U trubice v měřicí cele čistá.

Tabulka naměřených hodnot

číslo měření	teplota [°C]	hustota [kg/m ³]
1		
2		
3		
4		
5		

Závěr

Jak závisí hustota měřeného oleje na teplotě?

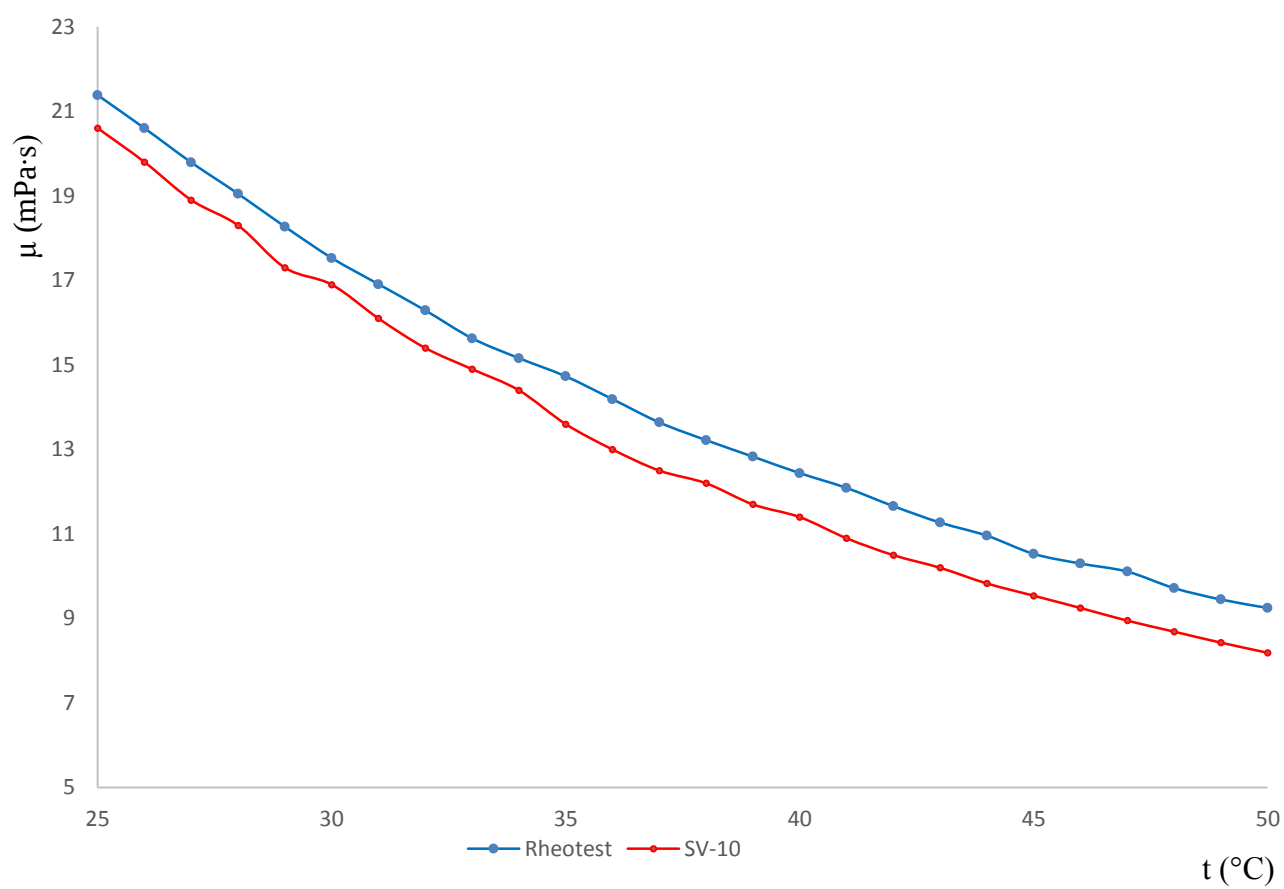
4. Praktická část

Měření viskozity pomocí rotačního viskozimetru Rheotest a vibračního viskozimetru SV-10

4.1 Olej na ozubená kola

	SV-10		Rheotest		DMA 35
t (°C)	μ (mPa·s)	ν (m ² /s)·10 ⁻⁶	μ (mPa·s)	ν (m ² /s)·10 ⁻⁶	ρ (kg/m ³)
25	20,6	24,29	21,38	25,21	848,2
26	19,8	23,35	20,60	24,30	847,9
27	18,9	22,30	19,79	23,34	847,6
28	18,3	21,60	19,05	22,49	847,1
29	17,3	20,43	18,27	21,58	846,6
30	16,9	19,98	17,53	20,72	846
31	16,1	19,05	16,91	20,00	845,3
32	15,4	18,23	16,29	19,28	844,7
33	14,9	17,66	15,63	18,52	843,9
34	14,4	17,08	15,16	17,98	843,1
35	13,6	16,14	14,73	17,49	842,4
36	13	15,45	14,19	16,86	841,6
37	12,5	14,87	13,64	16,23	840,7
38	12,2	14,52	13,22	15,73	840
39	11,7	13,94	12,83	15,28	839,3
40	11,4	13,59	12,44	14,83	838,6
41	10,9	13,01	12,09	14,43	837,8
42	10,5	12,54	11,66	13,93	837,1
43	10,2	12,20	11,27	13,48	836,3
44	9,83	11,77	10,96	13,12	835,4
45	9,54	11,43	10,53	12,62	834,5
46	9,25	11,10	10,30	12,36	833,6
47	8,95	10,75	10,11	12,14	832,7
48	8,69	10,45	9,72	11,68	831,7
49	8,43	10,15	9,45	11,37	830,7
50	8,19	9,87	9,25	11,15	829,7

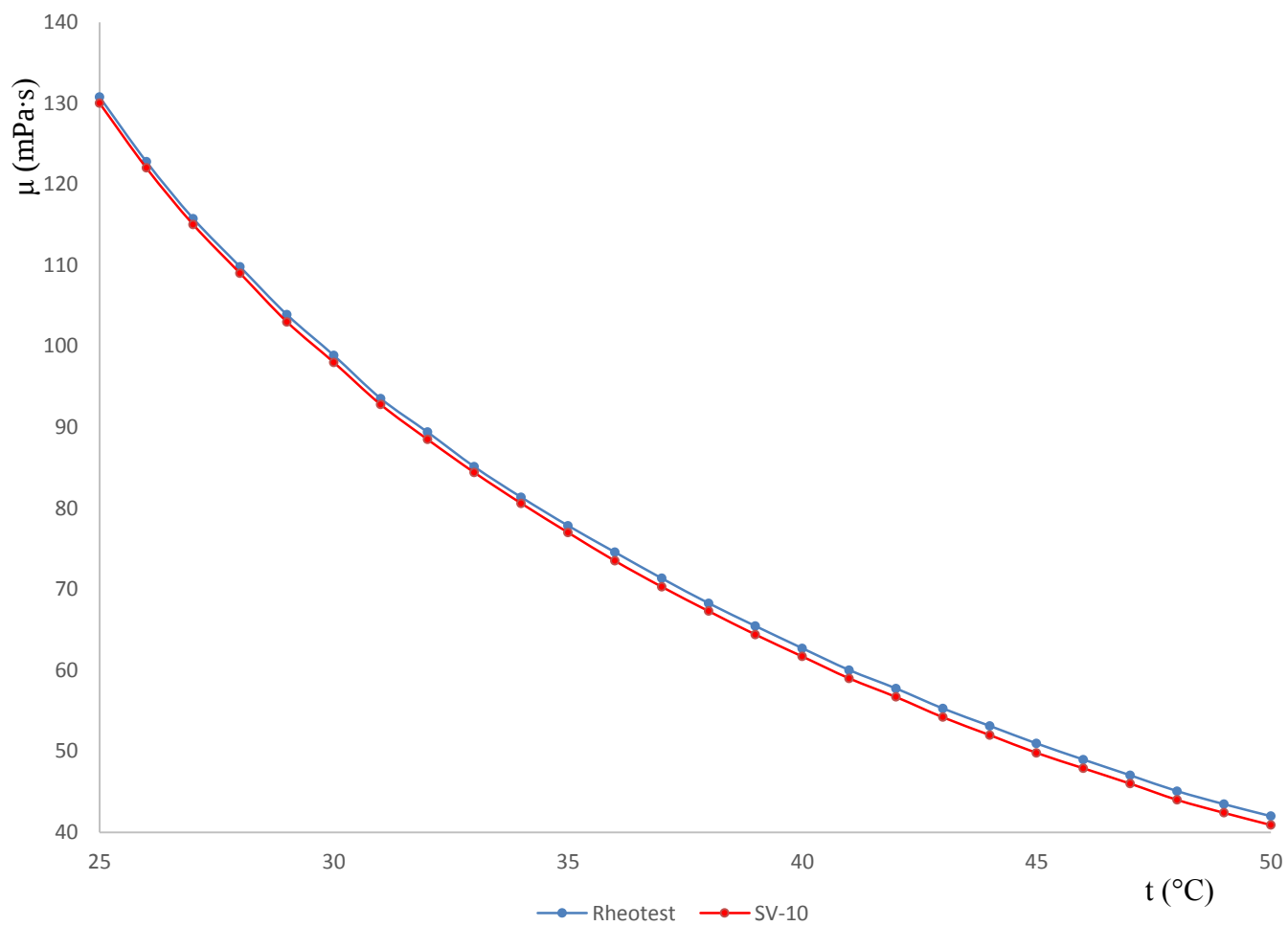
4.1.2 Graf závislosti viskozity na teplotě



4.2 Valvoline 10W-40

	SV-10		Rheotest		DMA 35
t (°C)	μ (mPa·s)	ν (m ² /s)·10 ⁻⁶	μ (mPa·s)	ν (m ² /s)·10 ⁻⁶	ρ (kg/m ³)
25	130	151,09	130,75	151,96	860,4
26	122	141,83	122,76	142,71	860,2
27	115	133,74	115,74	134,60	859,9
28	109	126,82	109,79	127,74	859,5
29	103	119,88	103,88	120,90	859,2
30	98	114,13	98,86	115,13	858,7
31	92,8	108,13	93,54	109,00	858,2
32	88,5	103,29	89,39	104,33	856,8
33	84,4	98,56	85,11	99,39	856,3
34	80,6	94,19	81,35	95,07	855,7
35	77	90,05	77,84	91,03	855,1
36	73,5	86,03	74,57	87,28	854,4
37	70,3	82,34	71,34	83,56	853,8
38	67,3	78,89	68,27	80,03	853,1
39	64,4	75,56	65,45	76,79	852,3
40	61,7	72,47	62,71	73,66	851,4
41	59	69,37	60,02	70,57	850,5
42	56,7	66,73	57,75	67,97	849,7
43	54,2	63,85	55,28	65,13	848,8
44	52	61,32	53,13	62,65	848
45	49,8	58,79	50,96	60,16	847,1
46	47,9	56,61	48,97	57,87	846,2
47	46	54,42	47,03	55,64	845,3
48	44	52,10	45,08	53,38	844,5
49	42,4	50,27	43,47	51,54	843,5
50	40,9	48,55	41,99	49,85	842,4

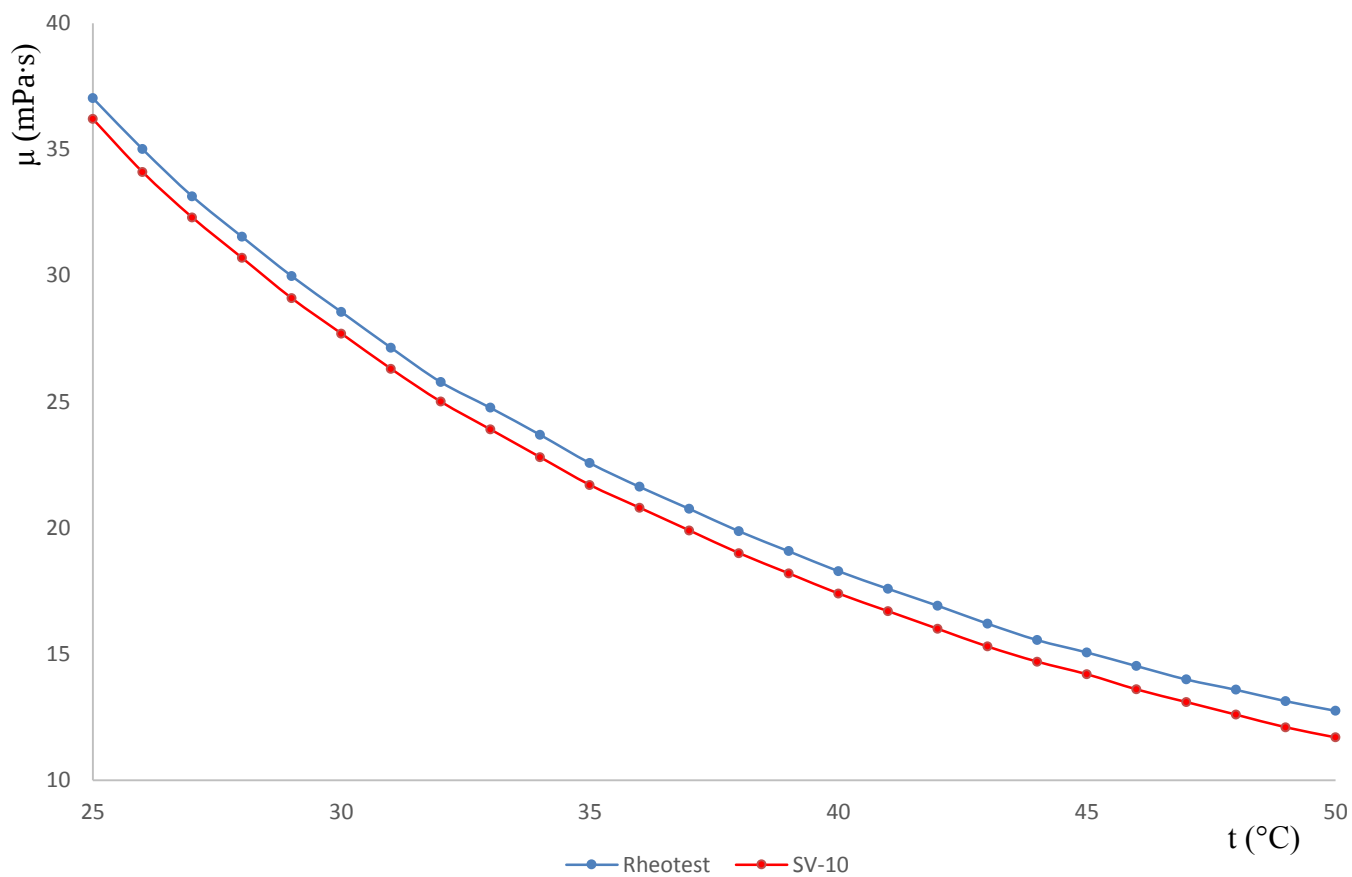
4.2.1 Graf závislosti viskozity na teplotě



4.3 Parafinový olej

	SV-10		Rheotest		DMA 35
t (°C)	μ (mPa·s)	ν (m ² /s)·10 ⁻⁶	μ (mPa·s)	ν (m ² /s)·10 ⁻⁶	ρ (kg/m ³)
25	36,2	42,23	37,03	43,19	857,3
26	34,1	39,81	35,01	40,88	856,5
27	32,3	37,75	33,14	38,73	855,7
28	30,7	35,91	31,54	36,89	855
29	29,1	34,06	29,98	35,09	854,3
30	27,7	32,45	28,56	33,46	853,5
31	26,3	30,85	27,14	31,83	852,6
32	25	29,35	25,78	30,27	851,7
33	23,9	28,09	24,76	29,10	850,9
34	22,8	26,83	23,69	27,87	849,9
35	21,7	25,56	22,57	26,58	849
36	20,8	24,53	21,63	25,50	848,1
37	19,9	23,49	20,76	24,50	847,2
38	19	22,45	19,87	23,48	846,2
39	18,2	21,53	19,08	22,57	845,2
40	17,4	20,61	18,29	21,67	844,1
41	16,7	19,81	17,59	20,86	843,1
42	16	19,00	16,92	20,10	842
43	15,3	18,19	16,21	19,28	840,9
44	14,7	17,50	15,56	18,53	839,8
45	14,2	16,93	15,07	17,97	838,6
46	13,6	16,24	14,53	17,35	837,4
47	13,1	15,67	14,00	16,74	836,1
48	12,6	15,10	13,59	16,28	834,7
49	12,1	14,52	13,14	15,77	833,4
50	11,7	14,06	12,76	15,33	832,1

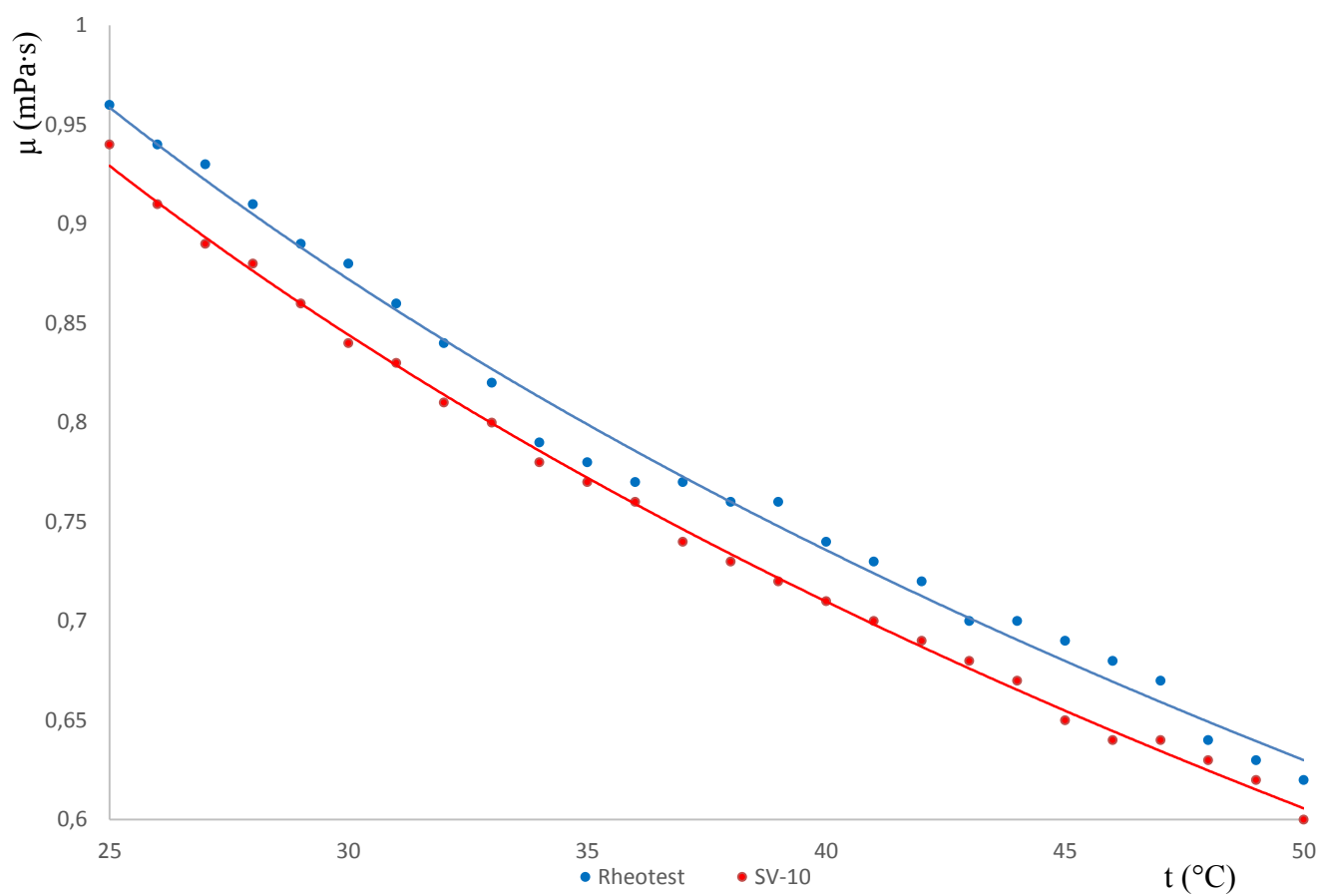
4.3.1 Graf závislosti viskozity na teplotě



4.4 Destilovaná voda

	SV-10		Rheotest		DMA 35
t (°C)	μ (mPa·s)	ν (m ² /s)·10 ⁻⁶	μ (mPa·s)	ν (m ² /s)·10 ⁻⁶	ρ (kg/m ³)
25	0,94	0,9428	0,96	0,9629	997
26	0,91	0,9130	0,94	0,9431	996,7
27	0,89	0,8931	0,93	0,9333	996,5
28	0,88	0,8834	0,91	0,9135	996,2
29	0,86	0,8635	0,89	0,8937	995,9
30	0,84	0,8436	0,88	0,8838	995,7
31	0,83	0,8339	0,86	0,8641	995,3
32	0,81	0,8141	0,84	0,8442	995
33	0,8	0,8043	0,82	0,8244	994,7
34	0,78	0,7844	0,79	0,7944	994,4
35	0,77	0,7746	0,78	0,7847	994
36	0,76	0,7649	0,77	0,7750	993,6
37	0,74	0,7450	0,77	0,7752	993,3
38	0,73	0,7352	0,76	0,7654	992,9
39	0,72	0,7254	0,76	0,7657	992,6
40	0,71	0,7159	0,74	0,7461	991,8
41	0,7	0,7060	0,73	0,7363	991,5
42	0,69	0,6961	0,72	0,7263	991,3
43	0,68	0,6861	0,70	0,7063	991,1
44	0,67	0,6764	0,70	0,7066	990,6
45	0,65	0,6564	0,69	0,6968	990,2
46	0,64	0,6466	0,68	0,6870	989,8
47	0,64	0,6469	0,67	0,6772	989,3
48	0,63	0,6370	0,64	0,6471	989
49	0,62	0,6272	0,63	0,6373	988,5
50	0,6	0,6073	0,62	0,6275	988

4.4.1 Graf závislosti viskozity na teplotě



5. Závěr

Před experimentem bylo nutné oba přístroje sériově připojit ke kapalinovému cirkulačnímu termostatu. Termostat ohříval neustále bez možnosti nastavení hraniční hodnoty teploty. Vzorky se tak nepodařilo temperovat na ustálené teplotě. Hodnoty viskozity z obou viskozimetrů se museli odečítat rychle, stejně tak i hustota. Hodnoty dynamické viskozity a hustoty byly měřeny pro rozsah teplot 25°C až 50°C. Teplotní závislost všech vzorků má exponenciální charakter a s teplotou klesá. Při měření dynamické viskozity bylo využito dvou metod, první je rotační viskozimetr Rheotest a druhou metodou měření je vibrační viskozimetr. Při měření rotačním viskozimetrem byly naměřeny hodnoty dynamické viskozity vyšší než v případě měření vibračním viskozimetrem SV-10. To bylo způsobeno tím, že u rotačního viskozimetru se neměří teplota měřeného vzorku, ale media z termostatu. Medium se oproti kapalině ve válci viskozimetru ohřívá rychleji a rozdíl teplot s rostoucí teplotou roste. Nejvyšší rozdíl teplot mezi mediem a vzorkem byl 3,2°C. Například tedy u rotačního viskozimetru nám teploměr ukazuje 30°C, ale ve skutečnosti měříme viskozitu o něco chladnějšího vzorku. Vidět je to například na grafu (4.1.2). Pro eliminaci tohoto problému by se buď musel použít termostat s nastavitelnou a udržitelnou teplotou a vzorek ohřívat dostatečně dlouho, aby se prohřál i uvnitř měřicího válce nebo do přístroje zabudovat termočlánek, který by měřil přímo teplotu měřené kapaliny. Další nevýhodou rotačního viskozimetru je, že neměříme přímo hodnotu viskozity, ale odečítáme dílky ze stupnice. Výsledek je tak více náchylný na lidskou chybu. Vibrační viskozimetr je snadný na obsluhu a všechny výsledky se nám zobrazují na displeji. Jediná nevýhoda je, že na výsledek mají vliv okolní vibrace a chvění, při spuštění termostatu, který cirkuloval vodu okolo nádoby se vzorkem byla výsledná hodnota viskozity větší o 0.1 mPa·s než při vypnutém termostatu. Žádné jiné nedostatky přístrojů jsem nenašel. S přístroji se pracuje dobře a viskozitu měří přesně.

6. Seznam obrázků

Obr 1.1	Vznik smykového napětí v tekutině podle Newtona.....	9
Obr 1.2	Schéma vzniku smykového napětí v proudícím plynu.....	10
Obr 1.3	Vektory rychlostí jednotlivých vrstev.....	11
Obr 2.1	Schéma kapilárního viskozimetru.....	14
Obr 2.2	Schéma výtokového viskozimetru.....	16
Obr 2.3	Rovnováha sil při pohybu koule ve viskozimetru.....	17
Obr 2.4	Schéma znázornění rotačních viskozimetrů.....	19
Obr 2.5	Rychlostní profil mezi rotujícími válci.....	20
Obr 2.6	Schéma válce rotačního viskozimetru.....	20
Obr 2.7	Schéma měření krouticího momentu.....	22
Obr 2.8	Schéma zapojení rotačního viskozimetru.....	23
Obr 2.9	Vibrační viskozimetr SV-10.....	25
Obr 2.10	Detail měřicí jednotky viskozimetru.....	26
Obr 2.11	Schéma zapojení vibračního viskozimetru.....	27
Obr 3.1	Přenosný hustoměr DMA 35.....	30

7. Seznam symbolů

τ	(Pa)	smykové napětí
F	(N)	síla
S	(m ²)	plocha
j	(s ⁻¹)	gradient rychlosti
Q	(m ³ ·s)	průtočné množství
μ	(Pa·s)	dynamická viskozita
dv	(m·s ⁻¹)	gradient rychlosti
dx	(m)	vzdálenost smykových rovin
ν	(m ² ·s ⁻¹)	kinematická viskozita
ρ	(g·cm ⁻³)	hustota
R	(m)	poloměr
L	(m)	délka
Δp	(Pa)	tlaková diference
V	(m ³)	objem
t	(s)	čas
k	(–)	konstanta viskozimetru
g	(m·s ⁻²)	gravitační zrychlení
M	(N·m)	moment síly
ω	(rad·s ⁻¹)	úhlová rychlost
n	(–)	počet měření
d	(m)	průměr
v	(m·s ⁻¹)	rychlost