

MĚŘENÍ PROVOZNÍCH VELIČIN V CUKROVARNICTVÍ

Měření viskozity

MEASUREMENT OF PROCESS VARIABLES IN SUGAR INDUSTRY:
VISCOSITY MEASUREMENT

Karel Kadlec, Tomáš Bartovský, Pavel Kadlec – Vysoká škola chemicko-technologická v Praze

Viskozita je fyzikální veličinou, která významným způsobem ovlivňuje průběh procesů při výrobě cukru a současně charakterizuje cukerné roztoky a cukrovarnické mezivýrobky, jako jsou cukroviny, melasa a další. Mezi procesy, u nichž se projevuje vliv viskozity média, patří např. čerpání cukerných roztoků, filtrace, odpařování, svařování cukrovin, mísení cukrovin a srobnů, odstředování, skladování a doprava koncentrovaných tekutých cukerných produktů (tekuté cukry, melasa aj.). Na základě sledování změn viskozity lze tyto procesy automaticky řídit; nejznámější je řízení průběhu svařování cukrovin.

Viskozita

Proudí-li tekutina, jsou její jednotlivé elementární objemy (molekuly) v relativním pohybu, přitom mají dvě sousední vrstvy rozdílnou rychlost a na jejich rozhraní dochází mezi nimi ke tření a ke vzniku smykového napětí. Navenek se to projevuje jako viskozita tekutiny. Pro laminární proudění, u kterého jsou jednotlivé proudnice rovnoběžné, a tekutina se nepromíchává, formuloval anglický fyzik Newton zákon, podle něhož je tečné napětí τ_N v kapalině úměrné viskozitě a gradientu rychlosti.

Vysvětlení tohoto vztahu vzniku viskozity ukazuje obr. 1. Mezi dvěma rovnoběžnými deskami se nachází kapalina. Dolní deska se nepohybuje, naopak horní deska o ploše S se může na tenké vrstvě kapaliny pohybovat. Tloušťka vrstvy tekutiny je h .

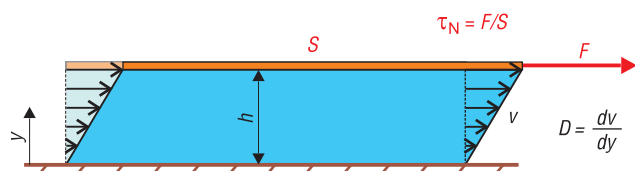
Za předpokladu, že rozměry desek jsou velké ve srovnání s tloušťkou vrstvy tekutiny, je možné zanedbat vliv okrajových částí desek. Při stálé rychlosti v pohybu horní desky se vytvoří lineární rychlostní profil. Pro udržení desky v pohybu je zapotřebí síla F , jejíž velikost je podle Newtona dána rovnicí:

$$F = S \cdot \eta \cdot \frac{dv}{dy} \quad (1),$$

kde η je dynamická viskozita a $D = dv/dy$ je gradient rychlosti. Vyjádříme-li tečné napětí $\tau_N = F/S$, pak po dosazení ze vztahu (1) dostaneme:

$$\tau_N = \eta \cdot D \quad (2),$$

Obr. 1. Model definice viskozity



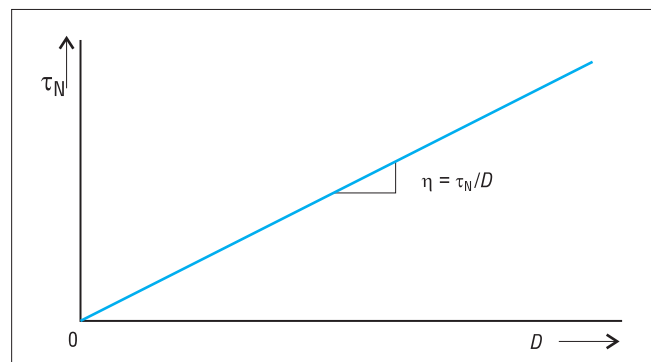
Tato rovnice představuje Newtonův zákon viskozity. Tekutiny, které se řídí tímto vztahem, se nazývají **newtonské**. Takto se chovají všechny plyny i páry a mnoho běžných kapalin, především voda. Závislost tečného napětí τ na gradientu rychlosti D pro newtonské kapaliny je na obr. 2.

Symbol η označuje **dynamickou viskozitu**. V některých přístrojích se hnací síla F vyvozuje pomocí gravitace působící na kapalinu. Výsledky se pak často vyjadřují jako **kinematická viskozita**, která je ve vztahu k dynamické viskozitě popsána vztahem:

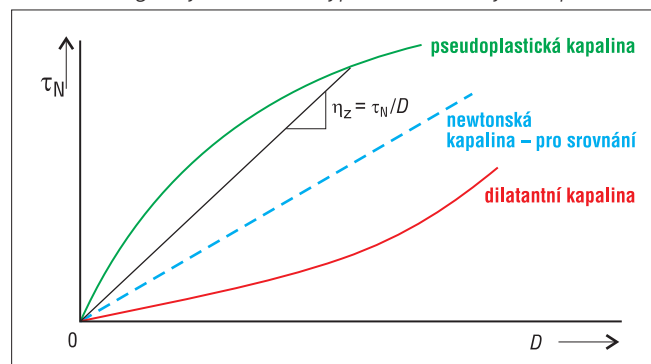
$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (3).$$

Jednotkou dynamické viskozity η je Pa·s, což je ekvivalent $(N \cdot s) \cdot m^{-2}$ či $kg \cdot (m \cdot s)^{-1}$. Jednotkou kinematické viskozity ν je pak $m^2 \cdot s^{-1}$. Starší jednotkou pro dynamickou viskozitu je poise ($1 \text{ poise} = 0,1 \text{ Pa} \cdot s$) a pro kinematickou viskozitu stokes ($1 \text{ stokes} = 0,0001 \text{ m}^2 \cdot s^{-1}$).

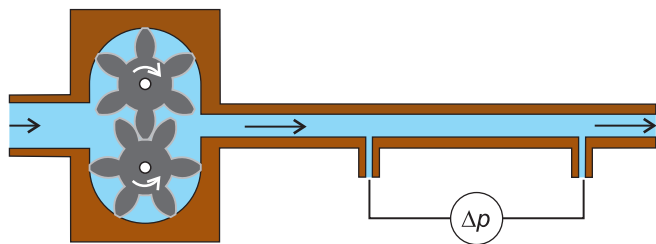
Obr. 2. Viskozita newtonské kapaliny



Obr. 3. Reogramy základních typů nenewtonských kapalin



Obr. 4. Princip provozního kapilárního viskozimetru



Obr. 5. Kapilární reometr RH 2000 (podle www.malvern.com)



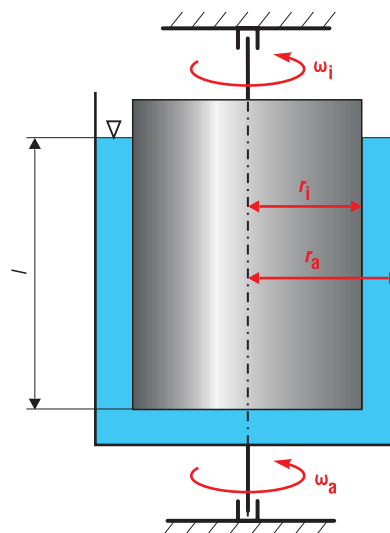
Pokud se chování kapalin neřídí vztahem odvozeným Newtonem, jedná se o **kapaliny neneutonské**. K nim patří např. suspenze, vyšší polymery, kečup, jogurt, těsto apod. Chování těchto kapalin se odchyluje od lineárního vztahu. Základní typy jsou **pseudoplastická kapalina** a **dilatantní kapalina**. Grafické znázornění mezi tečným napětím a gradientem rychlosti se označuje jako **reogram** nebo **tečná křivka** (obr. 3.). U pseudoplastických kapalin se **zdánlivá viskozita** η_z zmenšuje s rostoucím gradientem rychlosti. Naproti tomu se u dilatantních kapalin zdánlivá viskozita η_z s rostoucím gradientem rychlosti zvětšuje.

Obecně **závisí viskozita tekutin na teplotě a tlaku**. Zatímco u kapalin viskozita s teplotou klesá, u plynů viskozita roste. Je tedy důležité při měření viskozity znát, resp. udržovat konstantní teplotu. Pro měření viskozity se využívají **viskozimetry** pracující na různých principech, jejichž funkce je dále podrobněji popsána. Pro charakterizaci chování neneutonských kapalin se používají přístroje označované jako **reometry**, které umožňují vyhodnocovat kromě viskozity i jiné reologické vlastnosti a zaznamenávat např. průběh tečné křivky.

Viskozimetry

Pro měření viskozity kapalin se uplatňují v širším měřítku čtyři základní typy (1):
– kapilární viskozimetry,

Obr. 6. Principiální uspořádání rotačního viskozimetru



- rotační viskozimetry,
- viskozimetry s tělesem pohybujícím se vůči kapalině,
- vibrační viskozimetry.

Kapilární viskozimetry

U viskozimetrů tohoto typu se měří tlaková ztráta při laminárním proudění kapaliny úzkou dlouhou trubicí (kapilárou). Platí zde **Hagen-Poiseuillova rovnice**

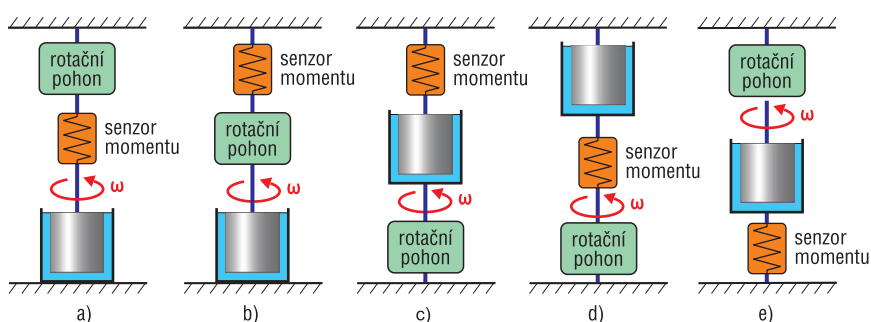
$$\eta = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot Q_v \cdot l} \cdot \Delta p \quad (4),$$

kde r je poloměr průřezu kapiláry, l délka na které se projevuje rozdíl tlaků Δp a Q_v objemový průtok kapilárou. Hagen-Poiseuillova rovnice platí pro tu část kapiláry, ve které není tok ovlivněn změnami průřezu na začátku a konci kapiláry.

U provozních kontinuálních viskozimetrů se obvykle vyloučí vliv vtokové a výtokové části kapiláry umístěním odběrů tlaku do té části kapiláry, kde je ustálený rychlostní profil proudění. Principiální uspořádání těchto viskozimetrů ukazuje obr. 4. Zubové čerpadlo poháněné synchronním motorem zajišťuje konstantní průtok měřeného média.

Pro jednorázové měření v laboratoři se obvykle používají skleněné **kapilární viskozimetry** v různém uspořádání. U všech je hnací silou gravitace. Tlakový rozdíl je dán rozdílem hladin v ramenech viskozimetru.

Obr. 7. Různá uspořádání pohonu a snímání momentu u rotačních viskozimetrů



Měří se čas Δt , za který hladina kapaliny projde mezi dvěma značkami. Pro tlakový rozdíl na kapiláře platí $\Delta p = \rho \cdot g \cdot \Delta h$. Viskozitu lze vypočítat, známe-li průměr kapiláry, její délku a rozdíl výšky hladin. Pro stanovení kinematické viskozity ν není nutné ani znát hustotu kapaliny, protože z Hagen-Poiseuillovy rovnice a vztahu pro Δp vyplývá:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\pi \cdot r^4}{8 \cdot Q_V \cdot l} \cdot g \cdot \Delta h \quad (5).$$

Objem mezi značkami je konstantní, takže po konečné úpravě platí:

$$\nu = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot g \cdot \Delta h}{8 \cdot V \cdot l} \cdot \Delta t \quad (6).$$

Často bývá jednodušší, místo proměřování všech detailních rozměrů, kalibrovat viskozimetr kapalinou o známé viskozitě. Potom se vztah (6) zjednoduší na:

$$\nu = K \cdot \Delta t \quad (7).$$

Na obr. 5. je kapilární reometr *RH 2000* od firmy Malvern Instruments Ltd., který je k dispozici s jednou nebo dvěma kapilárami. Vyhodnocovací software umožňuje komplexní sběr a analýzu dat (2).

Rotační viskozimetry

V základním uspořádání rotačních viskozimetrů se měřená kapalina nachází v mezeře mezi dvěma sousedními válci, které se otáčejí rozdílnou, avšak konstantní rychlostí (obr. 6.). Silový moment, který mezi válci vzniká, je funkcí viskozity kapaliny. Má-li být vztah mezi viskozitou a momentem jednoznačný, musí být pohyb kapaliny v mezeře stabilní. V souladu s definiční rovnicí viskozity, odvozenou za předpokladu rovnoběžného pohybu, musí být proudění mezi válci laminární.

Viskozimetry, u nichž se otáčí pouze vnější válec, jsou označovány jako **viskozimetry Couettova typu**. Stabilita proudění v těchto viskozimetrech je obecně velmi dobrá a případnou turbulenci je nutno přičíst na vrub působení koncových oblastí válců.

Druhým zvláštním případem je uspořádání, při kterém se otáčí pouze vnitřní válec. Jsou to **viskozimetry Searlova typu**. Zde se při proudění uplatňuje jiný typ nestability. Na rychleji se otáčející vrstvy kapaliny v blízkosti vnitřního válce působí odstředivá síla, která vyvolává nežádoucí radiální pohyb této kapaliny.

Každý rotační viskozimetr musí být vybaven pohonem otáčejícího se válce a snímáním momentu vytvářeného vnitřním třením v kapalině. Možnosti vzájemného uspořádání pohonu, snímače momentu a systému válců s kapalinou ukazuje obr. 7.

S uspořádáním a) a b) se setkáváme nejčastěji. Umožňují poměrně jednoduchou konstrukci i obsluhu. Uspořádání c) má výhodu v tom, že ani při relativně vysokých rychlostech otáčení nedochází ke vzniku Taylorových vírů, a tím k porušení laminárního pohybu kapaliny. Uspořádání d) a e) nepřinášejí zásadní výhody a běžně se nepoužívají.

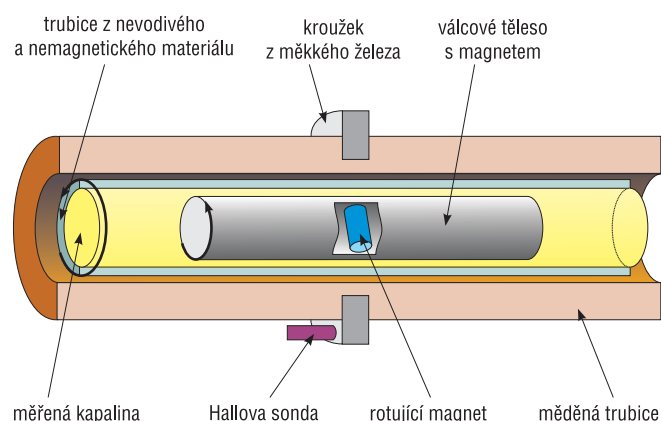
Obr. 8. Rotační reometr *Kinexus* (podle www.malvern.com)



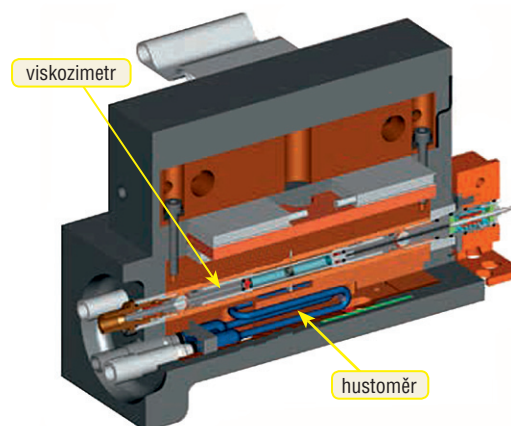
Viskozimetry s rotačním uspořádáním se často využívají pro řízení procesu svařování cukrovin.

Příklad rotačního reometru *Kinexus*, výrobek firmy Malvern (v ČR dodává ANAMET, s. r. o.) je na obr. 8. Vzorek je umístěn v prostoru mezi dvěma měřicími plochami, většinou se používá uspořádání deska-deska anebo kužel-deska, popř. válec-válec. Měřicí plochy pak vůči sobě vzájemně rotují tak, aby na vzorek působilo smykové napětí. Vkládání vzorku měřené kapaliny

Obr. 9. Schematický řez viskozimetrem typu *Stabinger* (upraveno podle www.anton-paar.com)



Obr. 10. Ústřední část přístroje *SVM 3000* se senzory viskozity a hustoty (upraveno podle www.anton-paar.com)



Obr. 11. Höpplerův viskozimetr (www.rheotest.de)

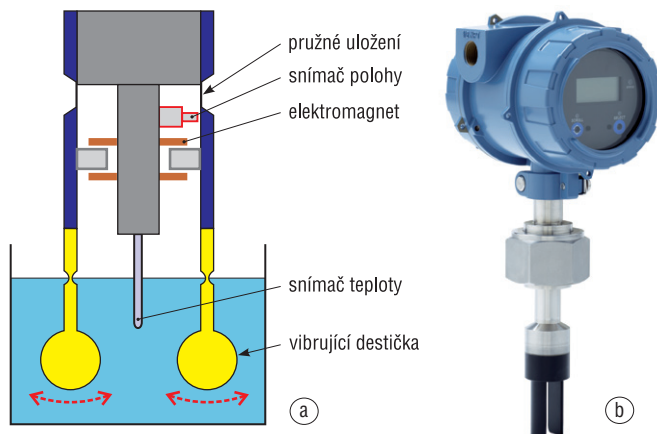


Obr. 12. Viskozimetr Lovis 2000 M/ME (www.anton-paar.com)



je na obr.8.b. Geometrické parametry měřicích prvků musejí odpovídat použitému materiálu a typu testu. Výměnu měřicích prvků u reometru *Kinexus* usnadňuje hřídelový mechanismus tzv. „quick-connect geometry” (obr. 8.c). Systém aktuální

Obr. 13. Vibrační viskozimetr: a) schéma, b) hustoměr a viskozimetr Micro Motion 7829



geometrii automaticky rozpozná a sám se nakonfiguruje pro dané měření (3).

Mezi rotační viskozimetry je možno zařadit i viskozimetr typu *Stabinger SVM 3000* firmy Anton Paar. Poháněn je vnější válec, který se otáčí rychleji než vnitřní válec. Funkci tohoto typu viskozimetru zajišťují tři sousední válce (obr. 9.). Vnější trubice vyrobená z mědi je pevná a neotáčí se. Uvnitř této trubice se otáčí konstantní rychlostí trubice z nevodivého a nemagnetického materiálu obsahující měřenou kapalinu a uvnitř této trubice se v kapalině vznášá válcové těleso, ve kterém je zalitý permanentní magnet. Rotující magnet přitom vytváří ve vnější měděné trubici vířivé proudy, které jeho otáčení brzdí. Tím brzdí i otáčení vnitřního tělesa, s nímž je spojen. Po ustálení, které proběhne velmi rychle, se vytvoří rovnováha mezi unášecím momentem kapaliny a brzdícím momentem vířivých proudů (4).

Další součástí systému je kroužek z měkkého železa, který slouží pro ustavení podélné polohy vnitřního tělesa. Na vnější straně měděné trubice je Hallova sonda, která využívá magnet vnitřního tělesa pro snímání rychlosti otáčení.

Při hodnocení některých kapalin je důležité znát kinematickou viskozitu a proto je součástí viskozimetru *SVM 3000* i hustoměr s vibrační trubicí (obr. 10.). Popis funkce hustoměru s vibrační trubicí byl uveden v březnovém čísle 2018. Senzory viskozity i hustoty se plní měřenou kapalinou současně a také měření probíhá ve stejné době. Měřicí rozsah přístroje *SVM 3000* je pro viskozitu 1 až 20 000 mPa·s a pro hustotu 0,65 až 3 g·cm⁻³. Měřicí systém je vybaven termostatem s Peltierovými články, který umožňuje rychlé a přesné ustavení teploty.

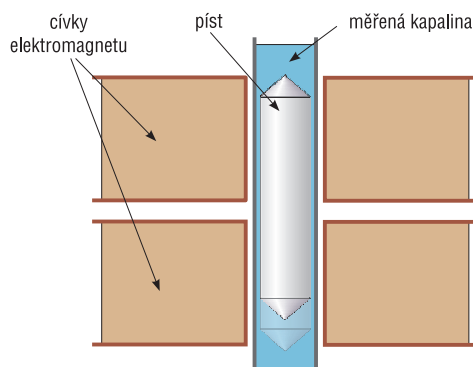
Tento přístroj nachází nejširší uplatnění při měření viskozity ropných produktů, jako je motorová nafta, mazací oleje aj., a to i díky širokému teplotnímu rozsahu měření (až od -20 °C až do +135 °C). U mazacích olejů je viskozita jejich nejdůležitějším kvalitativním parametrem. Důležitou aplikací je kontrola používaných olejů; vedle viskozity je zde významná i hodnota viskozitního indexu, která vypovídá o chování mazacích olejů při změnách teploty (měří se viskozita při 40 a 100 °C) a pro jejich další používání je důležitějším parametrem než doba používání.

Tělískové viskozimetry

Pohyb koule v nekonečně rozlehlé kapalině popisuje vztah:

$$F = 6 \cdot \eta \cdot \pi \cdot r \cdot v \quad (8),$$

Obr. 14. Viskozimetr s oscilujícím pístem



kde F je odpor proti pohybu (síla), r poloměr koule, v rychlost pohybu. Tento vztah však platí přesně jen pro takzvaný plíživý pohyb, tj. $Re < 1$. Padá-li za těchto podmínek koule vlastní vahou je možno vyjádřit viskozitu vztahem:

$$\eta = \frac{2 \cdot r^4 \cdot (\rho_k - \rho_v) \cdot g}{9 \cdot v} \quad (9),$$

kde ρ_k je hustota materiálu koule, ρ_v hustota kapaliny. Obvyklou možností je měření času τ , za který koule proběhne určitou dráhu (mezi dvěma značkami).

Příkladem viskozimetru s padající kuličkou je **Höpplerův viskozimetr** (obr. 11.). U tohoto viskozimetru padá kulička ve skleněné trubici skloněné od vertikály o 10°. Sklonem trubice je dosaženo stabilní a reprodukovatelné polohy kuličky vůči trubici. Skutečnost, že kapalina není nekonečně rozlehlá, je respektována při kalibraci.

Trubice je opatřena dvěma ryskami, mezi kterými se měří doba průchodu. Kuličky jsou skleněné nebo kovové, různého průměru, čímž je umožněno měření v širokém intervalu viskozity. Měřicí skleněná trubice je obklopena další trubicí většího průměru. Do vzniklého mezikruží lze přivádět chladicí kapalinu z termostatu, tím temperovat vzorek měřené kapaliny a provádět měření viskozity při různých teplotách. Systém trubic viskozimetru je otočný okolo vodorovné osy. Tím je umožněno po měření přesunout kuličku do horní polohy a měření opakovat, aniž by bylo nutné kuličku z měřicí trubice vyjmout.

Na obr. 11. je přístroj společnosti Rheotest Medingen **HÖPPLER KF 3.2** s měřicím rozsahem dynamické viskozity 0,6 až 70 000 mPa·s, při teplotě (–60 až 150 °C) (5).

Systém s kutálející se kuličkou, u kterého se měří čas obdobně jako v Höpplerově viskozimetru, využívá přístroj **Lovis 2000 M/ME** (obr. 12.) od firmy Anton Paar. Průchod kuličky značkou se snímá induktivně, což umožňuje měřit viskozitu neprůhledných kapalin. Přístroj charakterizují tyto údaje: malý rozměr měřicí kapiláry (objem vzorku 0,1 až 0,8 ml), dvě různé měřicí délky (krátká a dlouhá – šetří čas měření, který je minimálně 30 s, typicky 3 min), měření v širokém rozsahu viskozit (0,3 až 10 000 mPa·s), regulace teploty Peltierovým článkem, uzavřený měřicí systém (vylučuje odpařování a kontaminaci).

Vibrační viskozimetry

Vibrační viskozimetry jsou založeny na měření útlumu působícího na oscilující elektromechanický rezonátor ponořený do kapaliny, jejíž viskozitu je třeba určit. Rezonátor může oscilovat torzně (obvykle válcové těleso obdobné rotačnímu viskozimetru) nebo příčně (často má formu ladičky). Čím vyšší je viskozita, tím větší tlumení působí na rezonátor. Tlumení rezonátoru je možno měřit několika způsoby:

1. Měřením výkonu potřebného pro udržení konstantní amplitudy kmitů. Čím vyšší je viskozita, tím je potřeba více energie pro udržování amplitudy kmitání.
2. Měřením doby, za kterou se kmitání utlumí, tj. za kterou po vypnutí buzení amplituda poklesne pod určitou mez. Čím vyšší je viskozita, tím rychleji se kmitání utlumí.
3. Měřením frekvence rezonátoru vyplývající z fázového posunu mezi budícím signálem a pohybem oscilátoru. Čím vyšší je viskozita, tím větší je změna frekvence pro daný fázový posun.

Těleso spojené s oscilátorem kmitající v kapalině může mít různé tvary: kruhový terč, plochý pásek, deska jiného tvaru, válec nebo hranol; pro vyvážení setrvačných sil působících na uchycení bývají tělesa v páru.

Příklad možného uspořádání vibračního viskozimetru je schematicky znázorněn na obr. 13.a. Měří viskozitu podle hodnoty budícího elektrického proudu potřebného pro udržení stálé amplitudy kmitů při konstantní frekvenci 30 Hz. Amplituda se udržuje na hodnotě nižší než 1 mm. Malá amplituda znamená poměrně nízký gradient rychlosti, a tak je možné měřit viskozitu newtonských kapalin v blízkosti počátečního bodu. (Pozn.: Počáteční bod je limitní hodnota závislosti tečného napětí na gradientu rychlosti; u většiny kapalin je to nulová hodnota tečného napětí při nulovém gradientu rychlosti.) Jako příklad provozního snímače je na obr. 13.b uveden snímač hustoty a viskozity **Micro Motion 7829** (6). Senzor tvoří jednoduchá vidlicová ladička udržovaná elektronicky v rezonanci. Rezonanční kmitočet je určen hustotou kapaliny nebo plynu a tlumení vibrací je nepřímo úměrné viskozitě. Pro měření dynamické viskozity jsou k dispozici měřicí rozsahy od 0,5 až do 12 500 mPa·s.

Viskozimetry s oscilujícím pístem

Někdy se označují jako elektromagnetické viskozimetry. Senzor (obr. 14.) se skládá z měřicí komory, magneticky ovládaného pístu a dvou cívek elektromagnetu. Při měření je měřený vzorek v měřicí komoře, kde obklopuje píst. Elektromagnety uvádějí píst do kmitavého pohybu. Tekutina (kapalina nebo plyn) proudí v úzké mezeře mezi pístem a stěnami měřicí komory střídavě nahoru a dolů. Tečné napětí vyvoluje magnetická síla působící na píst a viskozita se stanoví podle doby, za kterou píst urazí danou dráhu. Rozměry pístu, tím i šířka mezery, se volí tak, aby odpovídaly rozsahu měřených viskozit.

Souhrn

Úvodní část článku je věnována významu viskozity jako fyzikální veličiny, která charakterizuje cukerné roztoky a cukrovarnické mezivýrobky a poskytuje informace pro řízení procesů při výrobě

ROZHLEDY

Klute U.

Mikrovlnná měřicí technika pro cukrovarnictví (Microwave measuring technology for sugar industry)

Článek pojednává o velmi rozšířených aplikacích měření obsahu sušiny cukerných sirůbů a cukrovin pomocí mikrovlnné měřicí techniky, která umožňuje velice přesné určení obsahu sušiny a hustoty ve všech oblastech cukrovarnictví, včetně kontinuálního měření během krystalizačního procesu. V teoretické části je vysvětlen princip mikrovlnného měření a vyhodnocení signálu. Z praktických aplikací je uvedeno např. stanovení obsahu vody v kostkovém cukru a stanovení hustoty vápeného mléka. Jako velká výhoda mikrovlnného měření je kromě přesnosti měření uváděna i jednoduchá automatická kalibrace.

Zuckerind./Sugar Ind., 143, 2018, č. 10, s. 590–594.

Kadlec

cukru. Dále jsou uvedeny definice dynamické a kinematické viskozity a vysvětleny pojmy newtonská a neneutonská kapalina. Podrobně jsou popsány funkční principy snímačů pro měření viskozity (viskozimetry kapilární, rotační, tělískové a vibrační). Jsou uvedeny příklady vybraných komerčně dostupných viskozimetrů a jejich funkční vlastnosti.

Klíčová slova: měření viskozity, kapilární viskozimetry, rotační viskozimetry, tělískové viskozimetry, vibrační viskozimetry.

Literatura

1. BARTOVSKÝ, T.; KADLEC, K.; KADLEC, P.: *Měření složení*. In KADLEC, K.; KMÍNEK, M.; KADLEC, P. (EDIT.) ET AL.: *Měření a řízení chemických, potravinářských a biotechnologických procesů*. Ostrava: Key Publishing, 2017, s. 433–446.
2. *ROSAND RH2000*. Katalog firmy MALVERN MRK0678. Malvern Instruments Ltd., 2016.
3. *KINEXUS Series*. Katalog firmy MALVERN MRK0678. Malvern Instruments Ltd., 2017.
4. *Stabinger Viscometer SVM 3000*. Katalog firmy Anton Paar GmbH, 2016.
5. *Kugelfallviskosimeter HÖPPLER KF 3.2* [on line] www.rheotest.de/rheotest-medingen/labormesstechnik/kugelfallviskosimeter-h%C3%B6ppler-kf-3-2/, cit. leden 2019.
6. *Micro Motion 7829 Visconic Viscosity Meter*. [on line] www.emerson.com/documents/automation/data-sheet-visconic-viscosity-meter-model-7829-micro-motion-en-63166.pdf, cit. leden 2019.

Kadlec K., Bartovský T., Kadlec P.: Measurement of Process Variables in Sugar Industry: Viscosity Measurement

The introductory part of the article is devoted to the importance of viscosity as a physical quantity that characterizes sugar solutions and sugar intermediate products and provides information for process control in sugar production. Further, definitions of dynamic and kinematic viscosity are included, and the concepts Newtonian and non-Newtonian fluids are explained. Functional principles of viscosity sensors are described in detail (gradually they are capillary, rotary, body and vibrating viscometers). Examples of selected commercially available viscometers and their functional properties are provided.

Key words: viscosity measurement, capillary viscometers, rotational viscometers, moving body viscometers, vibrating viscometers.

Kontaktní adresa – Contact address:

doc. Ing. Karel Kadlec, CSc., Vysoká škola chemicko-technologická, Ústav fyziky a měřicí techniky, Technická 5, 166 28 Praha 6 – Dejvice, Česká republika, e-mail: karel.kadlec@vscht.cz