

Reometrie stavebních směsí a lepidel

Ing. Adolf MUSIL
Ing. Petr MITÁČEK
MENDELU, Zkušebna STV Zlín

Jedna z nejdůležitějších vlastností plastových materiálů je jejich schopnost téci pod účinkem vyvozaných napětí. Kvantitativní vyhodnocení tečení, při vyjádření závislosti na působícím napětí, má velkou praktickou důležitost a je teoreticky zvládnutelné, i když chování zkoumaných látek je velmi složité, protože elastické a plastické deformace často probíhají současně. Považka křivek, vyjadřujících závislost napětí na prodloužení a deformace na čase (při konstantním zatížení) vypovídá o elastických a viskózních vlastnostech.

Na obrázku 1 je znázorněna typická křivka deformace, která je funkcí času $\{\varepsilon = f(t)\}$. Oblast \overline{AB} znázorňuje převážně elastickou deformaci, která se po odlehčení ztrácí.

Oblast \overline{BC} představuje deformaci složenou z viskoelastického a viskózního toku.

Po odlehčení v čase t_1 nastává okamžitý pokles deformace, který odpovídá jejímu nárůstu \overline{AB} .

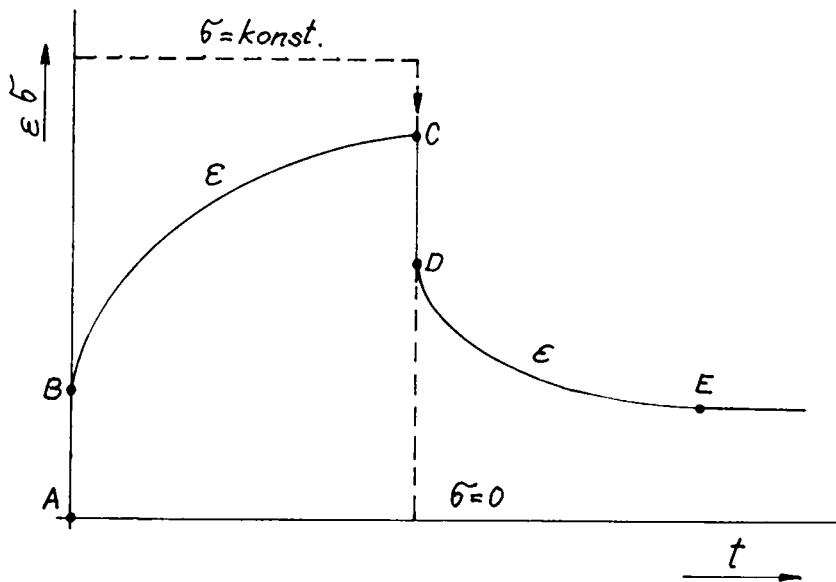
Dále nastává zotavení \overline{DE} a přechod na přímkovou část závislosti $\varepsilon - t$, převážně viskózní.

Popsat složité deformační chování zkoumaných polymerních roztoků, past, lepidel, tmelů a zesíťovaných hmot lze pomocí základních konstant, jako je viskozita, relaxační doba, mezní smykové napětí, modul pružnosti v tahu a smyku apod.

Dále se budeme zabývat zařízeními, které jsou poměrně jednoduché konstrukce, z jejichž geometrických charakteristik a praktických měření lze chování takových látek popsat.

Plastometr s paralelními deskami

Zařízení lze uplatnit při měření převážně viskózní deformace, prosté elastických a zpožděně elastických účinků. K měření bylo použito upraveného vytlačovacího plastometru, jehož princip je zobrazen na obrázku 2. Přístroj se skládá ze dvou kruhových desek, obou s průměrem 40 mm, z nichž horní je pohyblivá a spodní pevná. Horní deska je součástí svislého dřívku. Zkušební napětí je vyvozeno pomocí závaží umístěného na horním konci dřívku. Indikátor je upevněn k rámu plastometru a udává v každém okamžiku vzdálenost obou desek. Zkušební vzorky měly průměr 16 mm a výšku 0,8 mm ($R : h = 10$). Po působení zkušebního zatížení se odečetla hodnota h (vzdálenost obou desek) jako funkce času. Z grafu $1/h^4 = f(t)$ se určí stoupání m v rozsahu h . Viskozita se vypočítá ze vztahu:

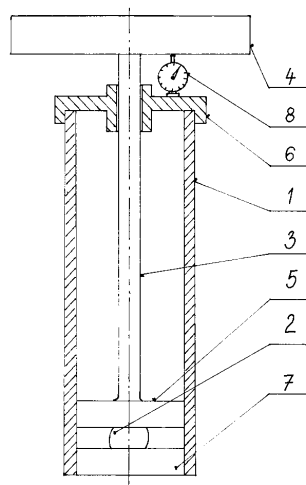


Obr. 1 – Časová závislost deformace při konstantním zatížení a následném odtížení

$$\eta = 8,21 \cdot 10^6 \cdot \frac{F}{m \cdot V^2}$$

kde je η viskozita [P]
 F zatížení [kg]
 m stoupání [$\text{cm}^{-4} \cdot \text{s}^{-1}$]
 V objem vzorku [cm^3]

Vzorec nezávisle odvodili ve svých pracích G. J. Dienes, H. F. Klemm a S. Oka. Námi provedená měření vedla ke stanovení viskozity vysoce lepidivé hmoty na bázi butylkaučuku, jejíž hodnota činila $\eta = 152037$ P, při průměrné smykové rychlosti $D = 0,1 \text{ s}^{-1}$.



Obr. 2 – Princip plastometru s paralelními deskami
1 – válec, 2 – zkoušený vzorek, 3 – dřívk horní desky,
4 – závaží, 5 – horní pohyblivá deska, 6 – vedení dřívku,
7 – dolní pevná deska, 8 – indikátor posunu

Vytlačovací plastometr

Vycházíme-li z modelu posunutí válcových vrstev při ustáleném jednorozměrném proudění válcovou trubicí konstantního průřezu bude pro tečné napětí v kapalině platit:

$$\tau = \frac{\Delta p \cdot r}{2l}$$

kde je Δp rozdíl tlaků
 r poloměr,
 R poloměr stěny trubice
 l délka trubice

τ ale nelze přímo měřit, takže tato rovnice není vhodná pro výpočet tlakového spádu. Z výrazu

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

kde je μ dynamická viskozita

$\frac{du}{dy}$ rychlostní gradient

určíme rychlost $u = \frac{\Delta p}{4\mu \cdot l} (R^2 - r^2)$.

Bodová lineární rychlost ale také není vhodnou veličinou pro přímé měření a proto je nahrazena objemovým průtokem V^* :

$$V^* = \int_0^R 2\pi r u dr$$

Po dosazení a integraci získáme vztah:

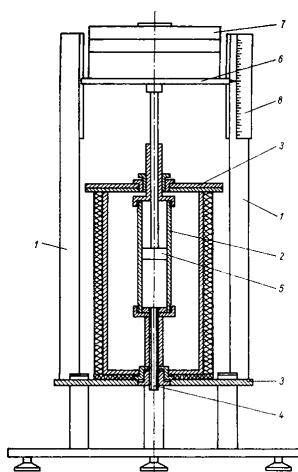
$$\frac{\Delta p R}{2l} = \mu \frac{4V^*}{\pi R^3},$$

což je Poiseuilleův zákon, jímž se řídí tokové poměry ve vytlačovacím plastometru (obrázek 3). Výraz na levé straně rovnice je tečné napětí pro $r = R$ (na stěně trubice):

$$\tau_s = \frac{\Delta p R}{2l}$$

a srovnáním vztahu:

$$\mu = \frac{\tau_s}{D_s}$$



Obr. 3 – Vytlačovací plastometr
1 – vodící sloupky, 2 – zkušební komora, 3 – třmeny, 4 – hubice, 5 – píst, 6 – vodící deska, 7 – závaží, 8 – stupnice

se zákonem Poiseuilla plyne pro

$$D_s = \frac{4V^*}{\pi R^3},$$

což je smyková deformace newtonské kapaliny u stěny trubice.

Při proměřování tokových vlastností plastického butylkaučukového tmelu o měrné hmotnosti $\rho = 1300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ bylo při tlaku $0,6 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ a průměru trubice 1 cm při délce 10 cm vytlačeno objemové množství $V^* = 0,0638 \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při smykové rychlosti $D_s = 0,65 \text{ s}^{-1}$. Dynamická viskozita takového vzorku v jeho ustálené tokové zóně činila $\eta = 230770 \text{ P} = 23077 \text{ Pas}$.

Rotační toky

Zkoumání a popsání rotačních toků reologicky rozličných kapalin nám usnadňuje pochopení jejich chování při rotační viskozimetrii a míchání. Viskozimetry pracují v různých



Obr. 4 – Vnitřní rotující válec v tělese rotačního viskozimetru a rotační viskozimetr

ném geometrickém uspořádání na principu pohybu rotačního vřetena ve zkoumané hmotě (obrázek 4). Např. mezi dvěma do sebe koaxiálně vloženými válci je mezera, ve které při otáčení vnitřního válce vzniká tzv. Couetteův tok v důsledku adheze mezi tekutinou a stěnami obou válců a vlivem jejího vnitřního tření. Geometrie by měla být volena tak, aby ve válcovém mezikruží nevznikaly Taylorovy víry dané toroidními spirálami po jeho obvodu. V případě laminárního proudění je hodnota kroutícího momentu M působícího na vnější válec úměrná úhlové rychlosti a koeficientu viskozity.

Na povrchu vnitřního válce s poloměrem r_1 a výšce h působí tečné napětí:

$$\tau_1 = \frac{M}{2\pi h r_1^2}$$

a v témže místě gradient rychlosti:

$$D_1 = \frac{2 \cdot \omega \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2}$$

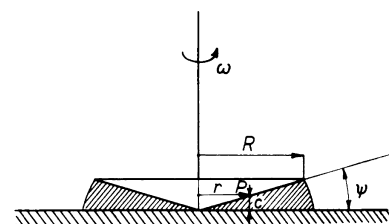
kde je ω úhlová rychlost

Dynamická viskozita se pak určí ze vztahu:

$$\eta = \frac{\tau_1}{D_1}$$

Jiné geometrické uspořádání je dáno rotačními reometry typu kužel – deska (obrázek 5). Měříme kroutící moment M na otáčejícím se hřídeli, kdy platí pro tečné napětí v kuželovité štěrbině:

$$\tau = \frac{3M}{2\pi R^3}$$



Obr. 5 – Schéma reometru kužel – deska

Gradient rychlosti je pak:

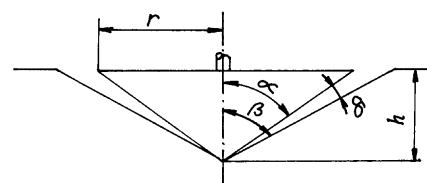
$$D = \frac{r \cdot \omega}{c} = \frac{r \cdot \omega}{r \cdot \text{tg} \psi} = \frac{\omega}{\text{tg} \psi} \doteq \frac{\omega}{\psi}$$

pro ψ v [rad]; $\psi [\text{rad}] = \frac{\pi}{180} \psi^0$

Vzorek se umístí na desku, přitlačí se kužel a systém se vytemperuje na zkušební teplotu. Rotací se na vzorek aplikuje napětí. Dynamická viskozita se pak vypočte ze vztahu:

$$\eta = \frac{\tau}{D}$$

Další geometrická sestava je dána systémem kužel – kuželová dutina, který vytváří plynulý přechod od systému kužel-deska (postupným zmenšováním vrcholového úhlu) až k tak jeho nízké hodnotě, že účinek je shodný s principem koaxiálních válců (obrázek 6).



Obr. 6 – Schéma viskozimetru kužel – kuželová dutina

Pro výpočet viskozity z měření na těchto systémech uvedl Peter S. vztah:

$$\eta = \frac{3M \sin(\beta - \alpha)}{4\pi^2 s r^2 \sin \alpha n}$$

kde n jsou otáčky [s^{-1}]

$$n = \frac{\varphi}{360t}$$

$$s = \frac{r}{\sin \alpha}$$

Vztah pro výpočet viskozity spojených systémů koaxiálních válců a kužel – kuželová dutina odvodili W. Holzmüller a I. Lorenz:

$$\eta = \frac{4M_1(r_2 - r_1)}{\pi L(r_2 + r_1)^3 \cdot \omega}$$

kde M_1 je moment připadající na koaxiální část
 L výška válcového pláště

S. Oka použil vztahu pro kužel-kuželová dutina:

$$M = \frac{2\pi h^3}{3 \cos^3 \beta} \cdot \eta \cdot \omega \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\cos \alpha}{\sin^2 \alpha} - \frac{\cos \beta}{\sin^2 \beta} \right) + \frac{1}{2} \ln \frac{\operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}{\operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}} \right]^{-1}$$

Z řady příkladů fyzikálně geometrického rozboru systému kužel-kuželová dutina byla nakonec odvozena rovnice J. Moravcem:

$$M = \frac{2\pi\omega\eta r^3}{3 \sin \gamma} \cdot \left\{ 1 + \left[\frac{2 \left(1 + \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha} \right)^2}{2 + \frac{\sin \gamma}{\sin \alpha}} - 1 \right] \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \right\}$$

Námi proměřované cementové směsi systémem kužel – deska vykazovaly hodnoty viskozit v rozmezí 329 až 513 mPa.s po 5 až 20 minutách od zamíchání složek (bez přísad). Úhel kužele vzhledem k rovině desky byl ale velký, takže docházelo ke zkreslování výsledků vlivem tzv. „schodišového efektu“ vznikajícího na povrchu zkoušených směsí.

Pokud se pohybujeme v oblasti malých smykových rychlostí vyvolaných úhlovou rychlostí ω , např. v rozmezí 1,57 až 3,14 s^{-1} se zanedbáním odstředivých sil, můžeme určit optimální úhel kužele k základně z rovnice:

$$\left(\frac{M}{2\pi R^3 \sigma_0} \right)^n = \mu \cdot \frac{\omega}{\alpha}$$

kde je M moment, jímž vnitřní tření v měřené kapalině působí na rotující kužel

R největší poloměr kužele

σ_0 srovnávací napětí

μ neneutonská viskozita

n index toku

ω úhlová rychlost

Je-li moment $M = 5,45$ N.m na poloměru $R = 16$ mm a materiálové konstanty měřené kapaliny $\mu = 4,55$ s a $n = 2,8$ vychází pro úhel α hodnota 1,6°.

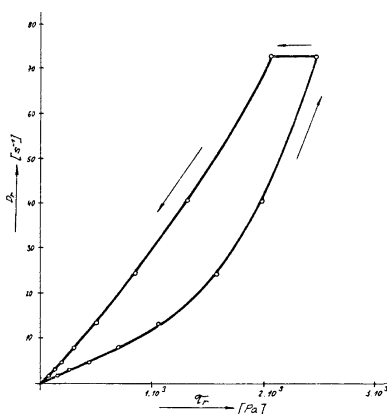
Pro silně plněné disperzní systémy je možno použít i geometrické uspořádání se dvěma paralelními deskami, kdy jedna z nich rotuje.

Efektivní reologie

Vnější projevy látek, u nichž se projevují tokové anomálie lze posuzovat reometricky jednak po lince fyzikální a jednak po lince technické.

V našem případě byly použity dva plastometry s vrcholovým úhlem kužele $2\alpha = 60^\circ$, kde u jednoho z nich byl vyloučen vliv setrvačných sil klidu a pohybu při vnikání kužele do prostředí. Míra tixotropie se vyjadřovala rozdílem vniku kužele s působením těchto sil (h_1) a ponoru kužele s vyloučením těchto vlivů (h'_1). Přitom se předpokládá u měření různých směsí m_1 a m_2 , kde $h_1 - h'_1 < h_2 - h'_2$, že vzorek m_2 vykazuje větší tixotropii.

Tixotropie (neboli tixotropní tok) je velmi výrazným a pro aplikaci velmi významným časově závislým tokem. Rheogramy směsí s tixotropním efektem se skládají ze dvou křivek, z nichž jedna je vzestupná a druhá sestupná (viz obrázek 7). Uzavřená plocha těmito křivkami se označuje jako tixotropní smyčka. Za určitých okolností lze říci, že tixotropie je tím vyhraněnější, čím je plocha tixotropní smyčky větší. V případě vícenásobné aplikace konstantního posuvného napětí na tentýž vzorek, projevuje se tixotropie tím, že při těchto opakovaných měřeních viskozita postupně klesá, až dosáhne stabilní hodnoty, jíž je udávána tzv. rovnovážná viskozita.



Obr. 7 – Reogram akrylátové směsi s tixotropním efektem

Zkoumané směsi se vyznačovaly především plastickým tokem, pro který je charakteristické, že toková křivka neprochází souřadnicovým počátkem, nýbrž vychází z osy posuvného napětí v určitém bodě, vzdáleném od souřadnicového počátku o určitou pozitivní hodnotu.

Tato hodnota se označuje jako mezní napětí. Význam mezního napětí si lze vyjasnit na základě schematické představy, podle níž plastické směsi při působení silových vlivů, jež jsou menší než hodnota mezního napětí, neprojevují tečení a jeví se tedy jako tuhé. Teprve překročí-li silové vlivy svou hodnotu mezního napětí, nastává vlastní tečení.

Metoda stanovení mezního smykového napětí je založena na ponoru kužele do plastického prostředí malou rychlostí, aby byl vyloučen vliv setrvačných sil, a uvažuje vztah:

$$\Theta = K \cdot \frac{G}{h^2}$$

kde je Θ mezní smykové napětí

G síla, jejíž působením se ponořuje

kužel

h maximální hloubka ponoření

kužele

K konstanta

Při uvažování rozložení plastické deformace v určitém objemu prostředí okolo kužele lze konstantu (K) určit výpočtem na základě teorie vzniku skluzových čar v okolí jeho ponoru. Pro úhel $2\alpha = 60^\circ$ je konstanta $K = 0,214$.

Na základě této teorie a v souladu s chováním neneutonských plastických kapalin chceme potvrdit, že rozdíl ponorů kuželů u aplikovaných metod souvisí s mírou tixotropie jednotlivých směsí. Jako reprezentativní byly zvoleny směsi A a B tohoto složení:

Směs A	
Složka	hm.d. [g]
Cement II/B – S 32,5 N	44,8
Vápenec VA 10	7,0
Písek (frakce 0-2)	48,2
Voda	22,0

Směs B	
Složka	hm.d. [g]
Cement II/B – S 32,5 N	44,8
Vápenec VA 10	7,0
Písek (frakce 0-2)	48,2
Prísada (Melment)	3,2
Voda	22,0

V následující tabulce jsou uvedeny naměřené hodnoty:

	h [mm]	h' [mm]	$h - h'$ [mm]
Směs A	18,2	12,1	6,1
Směs B	25,3	13,9	11,4

To znamená, že v souladu s dřívějším předpokladem, kde $h_A - h'_A < h_B - h'_B$, tvrdíme, že směs B vykazuje větší tixotropii než směs A. Nejprve určíme výchozí stav obou směsí, který lze charakterizovat tokovou rovnicí:

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \frac{du}{dy}$$

kde je τ tečné napětí
 μ_p plastická viskozita
 $\frac{du}{dy}$ gradient rychlosti

Vzhledem k tomu, že byl k měření použit kužel s vrcholovým úhlem $2\alpha = 60^\circ$ a hmotností 99 g, můžeme vypočítat mezní smykové napětí obou směsí:

$$\Theta = \tau_0 = K \cdot \frac{G}{h^2} = 0,214 \cdot \frac{99}{h^2}$$

	h' [cm]	τ_0 [p.cm ²]
Směs A	1,21	14,5
Směs B	1,39	11,0

Vzniklé tečné napětí τ na povrchu kužele je dáno poměrem třecí síly T k obsahu pláště kužele Q :

$$\tau = \frac{T}{Q} = \frac{G}{\pi \cdot r \cdot s \cdot \cos 30^\circ} = \frac{1,155G}{\pi \cdot r \cdot s}$$

kde je r poloměr kužele
 s délka povrchy kužele

	T [p]	r [cm]	s [cm]	Q [cm ²]	τ [p.cm ²]
Směs A	114,3	0,7	1,4	3,1	36,9
Směs B	114,3	0,8	1,6	4,0	28,6

Rychlost vnikání hrotu při ponoru kužele byla $v = 1 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ a odpovídající smyková rychlost $u = 2 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Z geometrie systému pak určíme i gradient rychlosti

$$D = \frac{du}{dy}$$

	dy [cm]	D [s ⁻¹]
Směs A	0,6	$3,33 \cdot 10^3$
Směs B	0,7	$2,86 \cdot 10^3$

Nyní můžeme vypočítat odpovídající plastické viskozity ze vztahu:

$$\mu_p = \frac{\tau - \tau_0}{D}$$

	μ_p [p.cm ² .s]	μ_p [Pa.s]
Směs A	6727	$6,727 \cdot 10^5$
Směs B	6154	$6,154 \cdot 10^5$

Srovnáme-li obě směsi, vidíme, že plastická viskozita se liší jen o 10%. Dále rozebereme chování obou směsí při rychlostech vniku kužele 600krát větších, tedy při $v = 10 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} = 600 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$. Mezní smykové napětí pak bude:

	h [cm]	τ_0 [p.cm ²]
Směs A	1,82	6,4
Směs B	2,53	3,3

Vzniklé tečné napětí τ na povrchu kužele bude:

	T [p]	r [cm]	s [cm]	Q [cm ²]	τ [p.cm ²]
Směs A	114,3	1,1	2,1	7,26	15,75
Směs B	114,3	1,5	2,9	13,67	8,36

a odpovídající smyková rychlost je $u = 1,15 \text{ [cm.s}^{-1}\text{]}$. Gradient rychlosti v závislosti na dy je (viz tabulka):

	dy [cm]	D [s ⁻¹]	$\tau - \tau_0$ [p.cm ²]	μ_p [Pa.s]
Směs A	0,9	0,63	9,35	$14,8 \cdot 10^2$
Směs B	1,27	0,46	5,06	$11,8 \cdot 10^2$

Pokles zdánlivé viskozity u směsi B je téměř 26%, což dokazuje, že tixotropie je větší než u směsi A.

Na závěr naší práce poukážeme na vybraných příkladech možnosti uplatnění výsledků reologických měření pro stanovení tlakových ztrát a nutných příkonů při dopravě a míchání nenewtonských směsí.

Máme čerpat rozpouštědlové lepidlo (vzorek 30/11) hustoty $\rho = 0,9 \text{ g.cm}^{-3}$ přímým potrubím o průměru 5 cm a délkou 200 m, kdy materiálové konstanty byly zjištěny měřením na viskozimetru Rheotest systémem válec – válec, kde koeficient konzistence $K = 3,05 \text{ g.cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-n-2}$ a index toku $n = 1,2$.

Použitý systém je dán sestavou válců S/S3 s průměry 40/32 mm a délkou 72 mm. Objem náplně byl 50 ml s hladinou 15 mm pod horní základnou vnitřního válce. Měření probíhalo na prvním rozsahu, kde $z_1 = 14,59 \text{ s}$ $\tau_r = 44500 \text{ mPa}$ při $D_r = 145,8 \text{ s}^{-1}$. Střední rychlost proudění při objemovém průtoku $V_f = 100 \text{ l.min}^{-1}$ bude:

$$\bar{u} = \frac{V_f}{\pi \cdot R^2} = \frac{100 \cdot 10^3}{60 \cdot \pi \cdot 2,5^2} = 85 \text{ [cm.s}^{-1}\text{]}$$

Druh proudění určíme z Reynoldsova kritéria:

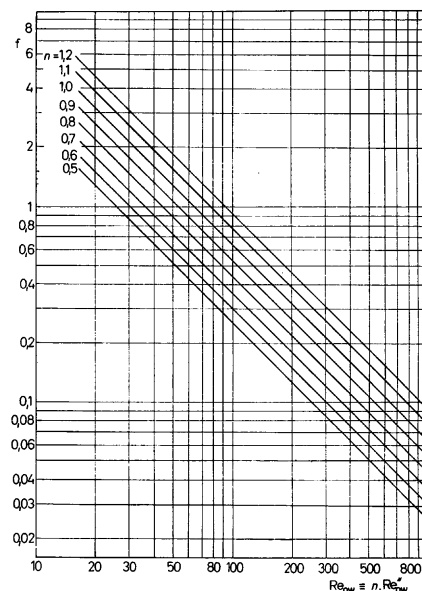
$$Re = \frac{d^n \cdot \bar{u}^{(2-n)} \cdot \rho}{K} = \frac{5^{1,2} \cdot 85^{0,8} \cdot 0,9}{3,05} = 71,2$$

z čehož plyne, že je laminární. Pro určení ztrátové výšky použijeme Fanningovu rovnici, kde:

$$H = f \cdot \frac{\bar{u}^2 \cdot l}{2g \cdot d} = 1,3 \cdot \frac{0,85^2 \cdot 200}{2g \cdot 0,05} = 191,55 \text{ [m]}$$

Koeficient tření byl odečten z grafu na obrázku 8. Nutný příkon pro daný hmotnostní průtok pak stanovíme:

$$N = H \cdot \frac{V_f \cdot \rho}{60} = 191,55 \cdot \frac{100 \cdot 0,9 \cdot 10^3}{60 \cdot 102} = 2817 \text{ W} \approx 2,8 \text{ kW}$$



Obr. 8 – Závislost koeficientu tření f na indexu toku n a Reynoldsovu kritériu Re [2]

Tlaková ztráta pak bude:

$$\Delta p_r = \frac{2Kl}{R} \left(\frac{3n+1}{n} \right)^n \left(\frac{V_f}{\pi R^3} \right)^n = \frac{2 \cdot 3,05 \cdot 2 \cdot 10^4}{2,5} \cdot \left(\frac{3 \cdot 1,2 + 1}{1,2} \right)^{1,2} \cdot \left(\frac{1667}{\pi \cdot 2,5^3} \right)^{1,2} = 16,836 \cdot 10^6 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \approx 17 \text{ atp}$$

Vzhledem k tomu, že lepidla kromě tekutých složek obsahují i pevné částice plniv, mají některé druhy sklon k jejich usazování. Uvažujeme-li výše popisovaný materiál, který promícháme ve válcovité nádobě průměru 60 cm s lopatkami o průměru 15 cm při otáčkách 120 ot. min^{-1} , určíme potřebný příkon na hřídeli míchadla tímto postupem:

$$\text{Počet otáček } n_0 = \frac{120}{60} = 2 \text{ s}^{-1}$$

Střední smyková rychlost se určí ze vztahu:

$$\bar{D} = k \cdot n_0 = 11 \cdot 2 = 22 \text{ s}^{-1}$$

kde je k univerzální konstanta ($k = 11$, J. Ulbrecht, P. Mitschka [2])

Zdánlivá viskozita se určí ze vztahu:

$$\bar{\mu}_z = K \cdot \bar{D}^{(n-1)} = 3,05 \cdot 22^{0,2} = 5,66 \text{ P}$$

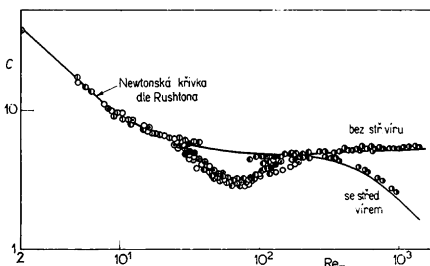
dále

$$Re = \frac{n_0 \cdot d^2 \cdot \rho}{\bar{\mu}_z} = \frac{2 \cdot 15^2 \cdot 0,9}{5,66} = 71,55$$

Hodnota Reynoldsova čísla leží v rozmezí 10 až 1000, což odpovídá přechodnému režimu míchání.

Z grafu na obrázku 9 [2] odečteme hodnotu příkonového kritéria $C \approx 3$ (křivka se středovým vírem). Potřebný příkon pak bude:

$$P = 3 \cdot \rho \cdot n_0^3 \cdot d^5 = 3 \cdot 0,9 \cdot 2^3 \cdot 15^5 = 0,164 \cdot 10^8 \text{ g} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-3} = 1,64 \text{ W}$$



Obr. 9 – Korelace pro míchání neneutonských kapalin ($n = 0,16 - 1,5$) [2]

Chování neneutonských kapalin je dosti složité a obecné řešení komplexního proudění není možné. V těchto případech se uchylujeme k experimentu, což umožňuje modelovat některé praktické projevy hlavně v oblasti případného turbulentního proudění. V předložené práci bylo popsáno, ale i matematicky podloženo řešení konkrétních situací toku a vypočtené příklady ukázaly, že se můžeme ke skutečnému chování těchto látek (deformace, tok, napětí, vnitřní tření) přiblížit s dostatečnou přesností.

Další výzkum by měl teoreticky podložit jednotlivá tvrzení a vést k zobecnění dílčích složitějších technických postupů.

	Použité označení	Rozměr
τ	tečné napětí	$ML^{-1}T^{-2}$
Δp	tlakový rozdíl	$ML^{-1}T^{-2}$
r	poloměr	L
R	poloměr trubice	L
l	délka trubice	L
μ	dynamická (newtonská) viskozita	$ML^{-1}T^{-2}$
$D = \frac{du}{dy}$	gradient rychlosti	T^{-1}
u	rychlost	LT^{-1}
V^*	objemový průtok	L^3T^{-1}
τ_s	tečné napětí u stěny pro newtonské i neneutonské kapaliny	$ML^{-1}T^{-2}$
D_s	rychlost smykové deformace u stěny	T^{-1}
M	kroučící moment	ML^2T^{-2}
n	index toku	bezrozměrný
ω	úhlová rychlost	T^{-1}
θ	mezní smykové napětí	ML^{-2}

Literatura

- [1] Wein, O., Wichterlová, J., Sobolík, V.: Viskozita vodných roztoků polyglykolu Emkarox HV45. CHEMagazín, ročník IX, č. 4, 1999
- [2] Ulbrecht, J., Mitschka, P.: Chemické inženýrství neneutonských kapalin. NČAV, Praha 1965
- [3] Moravec, J.: Příspěvek k hodnocení viskozity tavenin pomocí viskozimetru „kužel – kuželová dutina“. Chemický průmysl, ročník 12, č. 3/1962

- [4] Musil, A., Polášek, J., Polášek, M., Zálešák, J.: Geometry of characteristic joints. Holztechnologie, 52, 4/2011, Germany
- [5] Wein, O., Mitschka, P., Wichterle, K.: Rotační toky neneutonských kapalin. Academia, NČAV Praha 1981
- [6] Sebök, T., Krejčí, J., Musil, A., Šimoník, J.: A contribution to the explanation of the action principles of organic plasticizers. Cem Conc Res. 2005, vol. 35, USA
- [7] ČSN ISO 2555 (64 0346): 1997 Plasty – Prysčkyřice v kapalném, emulgovaném nebo dispergovaném stavu – Stanovení zdánlivé viskozity podle Brookfielda
- [8] ČSN EN ISO 3219 (64 0347): 1996 Plasty. Polymery/prysčkyřice v kapalném nebo emulgovaném nebo dispergovaném stavu. Stanovení viskozity rotačním viskozimetrem s definovanou smykovou rychlostí
- [9] ČSN EN ISO 3104 (65 6216): 1998 Ropné výrobky – Průhledné a neprůhledné kapaliny – Stanovení kinematické viskozity a výpočet dynamické viskozity
- [10] ČSN EN 13302 (65 7074): 2010 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity asfaltových pojiv rotačním vřetenovým viskozimetrem
- [11] ČSN EN 13702 (65 7103): 2010 Asfalty a asfaltová pojiva – Stanovení dynamické viskozity modifikovaných asfaltů metodou kužel a deska
- [12] ČSN EN 12092 (66 8620): 2002 Lepidla – Stanovení viskozity

NÁRODNÍ STAVEBNÍ CENTRUM BRNO



CENTRUM VZOROVÝCH MONTOVANÝCH DOMŮ

VZORKOVNA STAVEBNÍCH MATERIÁLŮ – 3D EXPOZICE

ODBOURNÉ VZDĚLÁVACÍ SEMINÁŘE A KONFERENCE

VZDĚLÁVÁNÍ V OBLASTI TRVALE UDRŽITELNÉ VÝSTAVBY

PRODEJNA ODBORNÉ LITERATURY

NSC

NÁRODNÍ STAVEBNÍ CENTRUM

CUV

CENTRUM UDRŽITELNÉ VÝSTAVBY

KONTAKT

BAUEROVA 10, 603 00 BRNO
Budova Nového Tuzexu, přízemíAreál BVV, vstup mezi branami 9 a 10

Tel.: 541 152 515
info@stavebnicentrum.cz
www.stavebnicentrum.cz