

# Úloha 13: Stanovení viskozity Stokesovou metodou

## Pomůcky

Válec naplněný glycerinem, dva posuvné prstence navlečené na válci, teploměr, hustoměr, skleněné kuličky, pinzeta, pásově měřítko, digitální stopky, utěrka na očištění pracoviště

## Úkol

Stanovte dynamickou viskozitu  $\eta$  a kinematickou viskozitu  $\nu$  technického glycerinu Stokesovou metodou.

## Dílčí úkoly

1. Změřte hustotu  $\rho_k$  a teplotu  $t_k$  glycerinu.
2. Změřte dráhu kuliček  $x$  jako vzdálenost dvou prstenců.
3. Pro jednu kuličku změřte čas  $\tau$ , za který urazí dráhu  $x$ . Stanovte Reynoldsovo číslo  $Re$  a ověřte, zda vyhovuje podmínce  $Re < 0,5$  (podmínka platnosti Stokesova zákona).
4. Pokud je podmínka platnosti Stokesova zákona splněna, měřte čas  $\tau$  opakovaně ( $10\times$ ).

## Poznámky k měření

- Zkontrolujte, že horní prstenec je navlečen alespoň 10 cm pod hladinou glycerinu a vzdálenost prstenců je alespoň 30 cm.
- Průměr skleněné kuličky  $d$  a její hustotu  $\rho_s$  uvádí výrobce:  $d = (3,450 \pm 0,020)$  mm,  $\rho_s = (2580 \pm 10)$  kg  $\cdot$  m<sup>-3</sup>.
- Reynoldsovo číslo  $Re$  je bezrozměrná veličina, která určuje poměr setrvačné a viskózní síly při obtékání tělesa. Pro vzájemnou rychlost  $v$  tekutiny a obtékaného tělesa, charakteristickou délku  $d$  obtékaného tělesa, a kinematickou viskozitu tekutiny  $\nu$  lze Reynoldsovo číslo vyjádřit vztahem

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu} .$$

## Matematické modely pro výpočet nepřímě měřených veličin

Dynamická viskozita glycerinu  $\eta$ :

$$\eta = \frac{1}{18} \cdot \frac{g_t d^2 \tau}{x} \cdot (\rho_s - \rho_k) \quad (1)$$

Kinematická viskozita glycerinu  $\nu$ :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho_k} = \frac{1}{18} \cdot \frac{g_t d^2 \tau}{x} \cdot \left( \frac{\rho_s}{\rho_k} - 1 \right) \quad (2)$$

$g_t$  ... tíhové zrychlení

$d$  ... průměr kuličky (dáno výrobcem)

$\rho_s$  ... hustota skla (dáno výrobcem)

$\rho_k$  ... hustota kapaliny (glycerinu)

$\tau$  ... doba průchodu kuličky mezi prstenci

$x$  ... vzdálenost prstenců

## Poznámky a návod k výpočtu nejistot

- Nejistoty se určují na základě vztahů (1) a (2).
- Nejistoty tabulkových hodnot (zde tíhové zrychlení  $g_t$ ) lze v kontextu laboratorních měření zanedbat a při výpočtu nejistot jsou považovány za konstanty.
- Veličina, která se podílí na nejistotě typu A:  $\tau$  (opakované měření).
- Nejistotu typu A lze vyjádřit pomocí relativních nejistot.
- Veličiny, které se podílejí na nejistotě typu B:  $\tau$ ,  $x$ ,  $d$ ,  $\rho_k$  a  $\rho_s$ .
- Maximální chyba vzdálenosti  $x$  musí reflektovat šířku prstenců a odhad kolmého směru.
- Pro průměr kuličky  $d$  a její hustotu  $\rho_s$  výrobce uvádí přímo nejistotu.
- Nejistotu typu B lze vyjádřit pomocí relativních nejistot za předpokladu, že se provede substituce výrazů v závorkách a následně se vyjádří jejich relativní nejistota.

Dynamická viskozita  $\eta$ :

- Zavedená substituce je prostým rozdílem (lineární kombinací):  $\Delta\rho = \rho_s - \rho_k$
- Relativní nejistota substituovaného výrazu:

$$u_{r\Delta\rho} = \frac{u_{\Delta\rho}}{\Delta\rho} = \frac{\sqrt{u_{\rho_s}^2 + u_{\rho_k}^2}}{\Delta\rho} = \frac{\sqrt{u_{\rho_s}^2 + u_{\rho_k}^2}}{\rho_s - \rho_k}$$

- Při zanedbání nejistoty hustoty kapaliny  $u_{\rho_k}$  vůči nejistotě hustoty skla  $u_{\rho_s}$  se vyjádření nejistoty zjednoduší:

$$u_{r\Delta\rho} = \frac{u_{\rho_s}}{\rho_s - \rho_k} = \frac{u_{\rho_s}}{\Delta\rho}$$

Kinematická viskozita  $\nu$ :

- Zavedená substituce je výraz:  $a = \frac{\rho_s}{\rho_k} - 1$
- Nejistotu substituovaného výrazu je třeba vyjádřit pomocí parciálních derivací:

$$u_{ra} = \frac{u_a}{a} = \frac{1}{a} \cdot \sqrt{\left(\frac{\partial a}{\partial \rho_s}\right)^2 u_{\rho_s}^2 + \left(\frac{\partial a}{\partial \rho_k}\right)^2 u_{\rho_k}^2} = \frac{1}{\rho_s - \rho_k} \cdot \sqrt{u_{\rho_s}^2 + \left(\frac{\rho_s}{\rho_k}\right)^2 u_{\rho_k}^2}$$

- Při zanedbání nejistoty hustoty kapaliny násobené citlivostním koeficientem  $\frac{\rho_s}{\rho_k} \cdot u_{\rho_k}$  vůči nejistotě hustoty skla  $u_{\rho_s}$  se vyjádření nejistoty  $u_{ra}$  zjednoduší na stejný výraz jako pro nejistotu  $u_{r\Delta\rho}$ :

$$u_{ra} = \frac{u_{\rho_s}}{\rho_s - \rho_k} = \frac{u_{\rho_s}}{\Delta\rho} = u_{r\Delta\rho}$$

## Podněty k diskusi

- Diskutujte zanedbatelnost nejistoty hustoty kapaliny  $u_{\rho_k}$  ve srovnání s nejistotou hustoty skla  $u_{\rho_s}$ .
- Dynamická viskozita glycerinu  $\eta$  je tabulkovou hodnotou. Stanovte odchylku od tabulkové hodnoty a diskutujte vliv koncentrace glycerinu a teploty.

Poznámka: Glycerin je v tabulkách často uváděn pod názvem glycerol.