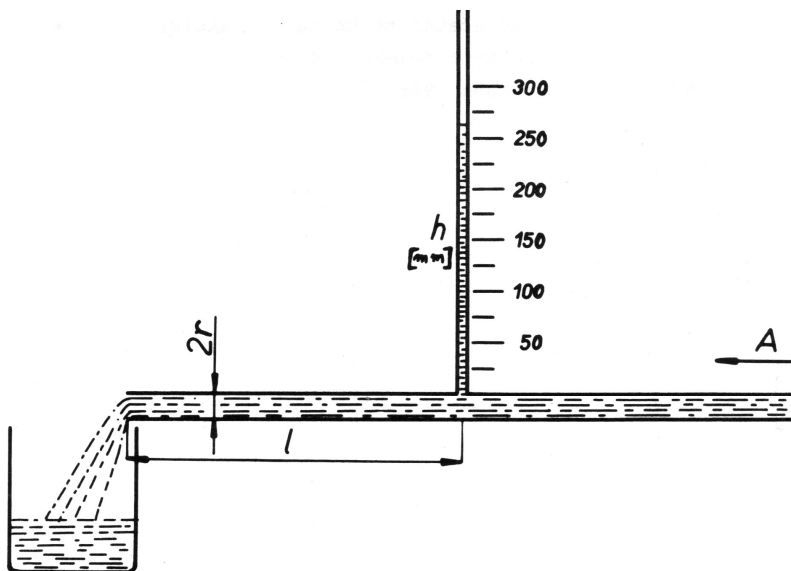


III. Studium proudění viskózní kapaliny trubicemi kruhového průřezu

K elementárnímu seznámení s laminárním a turbulentním prouděním může sloužit následující úloha, v které budeme sledovat průtok kapaliny různými trubicemi při stoupající rychlosti proudění. Trubice s vhodně volenými průměry umožňují studium laminární, přechodové i turbulentní oblasti proudění.

Na zařízení schematicky znázorněném na obr. 1 lze studovat typy proudění vody a zároveň určit závislost odporu trubice na veličinách charakterizujících proudění.



Vodorovná skleněná trubice o vnitřním poloměru r je ve vzdálenosti l od svého ústí opatřena manometrickou trubicí. Přívod vody je k trubici napojen v místě označeném A, přičemž lze nastavit různou rychlost proudění. Úbytek statického tlaku Δp na délce l je úměrný výšce h vodního sloupce v manometrické trubicí

$$\Delta p = h\rho g, \quad (1)$$

kde ρ je hustota kapaliny a g je místní tíhové zrychlení. Přetlak Δp závisí na rychlosti proudění.

Kapalina z trubice vytéká do odměrného válce, v kterém se měří objem kapaliny V přitéklý za daný časový interval t . Měření se provádí na několika trubicích různého poloměru r .

Při střední rychlosti v_s proudění v trubici, při které Reynoldsovo číslo

$$Re = \frac{r\rho v_s}{\eta} \quad (2)$$

má hodnotu menší, než je jeho kritická hodnota (přibližně 2000), je proudění laminární. V rovnici (2) je ρ hustota a η dynamická viskozita proudící kapaliny. Objemový průtok $Q_v = V/t$ je při laminárním proudění dán Poisseuillovou rovnicí

$$Q_v = \frac{\pi r^4}{8\eta l} \Delta p. \quad (3)$$

Měříme-li závislost objemu kapaliny proteklé trubicí za jednotku času Q_V na úbytku tlaku Δp , dostáváme pro laminární proudění přímou úměrnost mezi Q_V a Δp . Směrnice zjištěné závislosti závisí na rozměrech trubice. Známe-li rozměry trubice r a l a dosadíme-li tabulkovou hodnotu viskozity η měřené kapaliny, můžeme porovnat experimentálně zjištěnou směrnici závislosti $Q_V = Q_V(\Delta p)$ s její hodnotou plynoucí z rovnice (3). Shoda nebývá ideální, tlakové poměry v místě nasazení manometrické trubice jsou složité a výška kapaliny v manometrické trubici nevystihuje zcela přesně přetlak p v měrné trubici. Uvedené zařízení je vhodné k sledování charakteru proudění, nebylo by však příliš přesné jako zařízení pro měření viskozity proudící kapaliny.

Po překročení kritické hodnoty Reynoldsova čísla, v oblasti přibližně $1000 < Re < 2000$, bývá proudění trubicí nestabilní a naměřené hodnoty závislosti $Q_V = Q_V(\Delta p)$ mívají značný rozptyl. Pro ještě větší hodnoty Reynoldsova čísla je proudění již trvale turbulentní. Závislost $Q_V = Q_V(\Delta p)$ se odkloní od původní přímky a poměr odpovídajících hodnot Q_V a Δp je menší než v laminárním případě.

Zavedeme-li *součinitel odporu trubice* k , můžeme úbytek statického tlaku na délce trubice l vyjádřit vztahem

$$\Delta p = k \cdot \frac{l}{r} \cdot \frac{1}{2} \rho v_s^2, \quad (4)$$

kde v_s je střední rychlost v průřezu proudové trubice. Pro objemový průtok platí

$$Q_V = \pi r^2 v_s. \quad (5)$$

Pro laminární proudění pak z rovnic (2) - (5) dostaneme teoretickou závislost součinitele odporu na rychlosti proudění ve tvaru

$$k = \frac{16}{Re}. \quad (6)$$

Experimentálně zjištěná závislost $k(Re)$ pro proudění turbulentní je značně složitější. Pro trubice s hladkými stěnami se udává pro tuto závislost tento vzorec [2]:

$$k \approx \frac{0,133}{\sqrt[4]{Re}}. \quad (7)$$

Jestliže se z experimentálních údajů pomocí rovnic (2) - (5) vypočítá Re a z rovnice (4) k , lze sestavit graf závislosti $k(Re)$. Experimentálně zjištěné údaje pro trubice s různými průměry a různých délek lze pak tímto způsobem zpracovat do jediného grafu. V oblasti laminárního proudění by odpovídající si body pro různé poloměry trubice měly být rozloženy podél teoretické závislosti dané rovnicí (6).

K měření průměru trubice máme k dispozici pouze posuvné měřítko umožňující měřit s přesností 0,1 mm. Tato přesnost je pro naše potřeby nedostačující, jak pravděpodobně uvidíme z malé shody experimentální přímkové závislosti v oblasti laminárního proudění s přímkou teoretickou plynoucí z rovnice (3). Opravou parametru r lze hledat pomocí počítače nejlepší přiblížení teoretické závislosti k experimentální. Tak lze zpřesnit určení poloměru r až o 1 řád na základě měření závislosti $Q_V = Q_V(\Delta p)$ v laminární oblasti proudění.

Literatura:

- [1] J. Brož a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1967, kap. 2.5.2, čl 2.5.2.1, kap. 2.5.3, čl 2.5.3.3
- [2] J. Brož a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983, kap. 2.4.2, kap. 2.4.5, čl 2.4.3.1
- [3] Z. Horák, F. Krupka: Fyzika, SNTL, Praha 1981, kap. 2.8.10
- [4] J. Kvasnica a kol.: Mechanika, Academia, Praha 1988, kap. 10.4