

# Určování povahy toku a výpočet příslušných hodnot Reynoldsova čísla

## *Úvod:*

Reynoldsovo číslo  $Re$  má význam pro posouzení charakteru proudění tekutin. Tekutiny mohou proudit laminárně, přechodově nebo turbulentně. Reynoldsovo číslo má zásadní význam při výpočtech proudění tekutin (tření v potrubích a armaturních prvcích, míchání, usazování, kinetice tepelných a difúzních operací apod.).

## *Úkol:*

Realizovat laminární, přechodový a turbulentní tok vody ve skleněných trubkách různého průměru a stanovit maximální hodnoty  $Re$  pro uvedené charaktery toku a trubice použitých průměrů.

## *Teoretický úvod:*

Tekutiny mohou proudit potrubím laminárně, přechodově nebo turbulentně. Oblast, ve které pozbývá proudění laminárního charakteru (proudnice kapaliny se začíná vlnit a rozplývat), ale ještě nenabýlo plně znaků turbulentního proudění, nazýváme oblastí přechodovou. V turbulentní oblasti se barevná proudnice velmi rychle rozptýlí po celém průřezu trubice, takže proud kapaliny se prakticky homogenně probarví. Na charakteru proudění závisí hodnota Reynoldsova čísla (kriteria), definovaného rovnicí

$$Re = \frac{d v \rho}{\eta} \quad (1)$$

kde  $d$  je průměr potrubí,  $v$  průměrná rychlost proudění v jeho průřezu,  $\rho$  hustota kapaliny,  $\eta$  její dynamická viskozita.

V literatuře se uvádí počátek přechodové oblasti při  $Re = 2300$ , počátek turbulentní při 4 000 nebo dokonce  $10^4$  jen pro proudění potrubím. Pro míchání, usazování nebo jiné operace platí jiné hodnoty. Z přesnosti uvedených čísel vyplývá, že Reynoldsovo číslo je velmi přibližným kriteriem pro rozhodování o charakteru proudění.

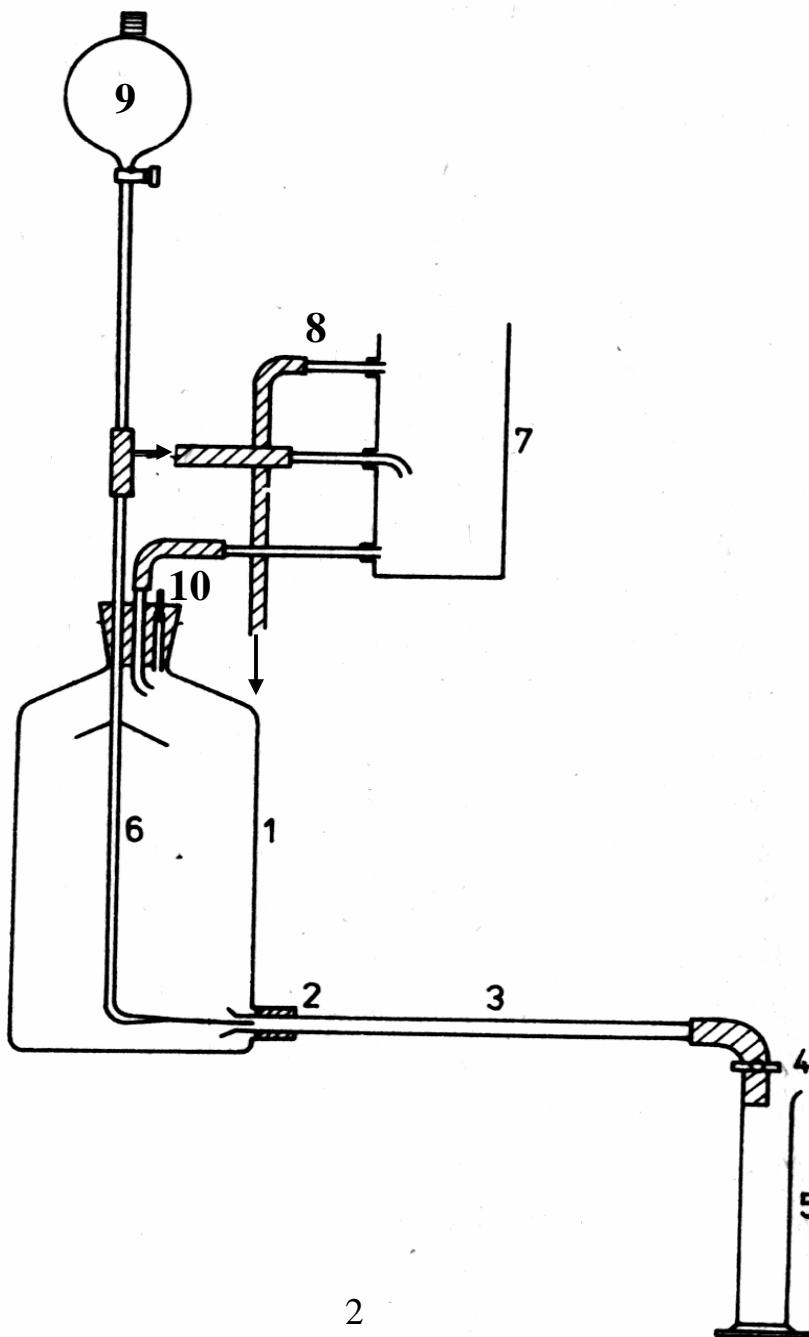
Při proudění reálných kapalin potrubím si představujeme, že kapalina vytváří souosé duté válce diferenciální tloušťky, které se po sobě posouvají různými rychlostmi. Válec na obvodu proudu je úplně zbrzděn třením o stěny trubky, další válce se posouvají směrem ke středu stále větší rychlostí a brzdí se vnitřním třením. Největší rychlost má kapalina v ose potrubí. Kapalina tak vytváří v průřezu potrubí charakteristický rychlostní profil. Při laminárním proudění má rychlostní profil tvar paraboly a proud kapaliny tvar rotačního paraboloidu. V přechodové oblasti se vrchol paraboloidu zplošťuje a vytváří

turbulentní čelo, které se v turbulentní oblasti rozšíří prakticky na celý průřez trubice.

Svazek zbarvené kapaliny - proudnice - přiváděný do osy stejnou rychlostí jakou má proudící kapalina, vytváří v laminární oblasti přímku. Při překročení laminární oblasti zvýšením průtoku se začne proudnice vlnit. Zvlnění proudnice je charakteristické pro přechodovou oblast. Při dalším zvýšení průtoku můžeme dosáhnout rozptýlení proudnice po celém průřezu trubice, které je charakteristické pro turbulentní proudění.

Uvedené charaktery proudění se projeví hodnotami Reynoldsových čísel. Reynoldsovo číslo je tedy kriteriem charakteru proudění.

Průměrnou rychlost proudění  $v$  v trubce nemůžeme měřit přímo. Vypočítáme ji z objemu  $V$  vody nateklé do odměrného válce za dobu  $\tau$  trubicí o průměru  $d$  a dosadíme do rov.(1)



$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{d v \rho}{\eta} = \\ &= \frac{4d V}{\pi d^2 \tau} = \\ &= \frac{4}{\pi d} \cdot \frac{V}{\tau} = k_d \cdot \frac{V}{\tau} \end{aligned}$$

(2)

**Sestava aparatury:**

Charakter proudění vody posuzujeme a veličiny potřebné pro výpočet měříme na aparatuře podle následujícího obrázku

Aparatura k pozorování charakteru proudění

a výpočtu kritických hodnot Reynoldsova čísla

1 - láhev 10 l, 2 - tubus, 3 - pozorovací trubice, 4 - tlačka, 5 - odměrný válec, 6 - trubice s kapilárou, 7 - dekantační válec, 8 - přepad, 9 - dělicí nebo přikapávací nálevka, 10 - pryžová zátka s odvzdušňovacím otvorem

### ***Postup při měření:***

Posuvným měřítkem změříme průměr  $d$  výtokového otvoru pozorovací trubice 3, vypočteme hodnotu konstanty  $k_d$  (včetně jednotky!) a obě hodnoty zapíšeme do záhlaví tabulky naměřených a vypočtených hodnot.

Sestavíme aparaturu podle obrázku a dbáme zejména na pečlivé geometrické uložení kapiláry trubice 6. Úpravu polohy trubice 6 si usnadníme natřením otvoru v zátce 10 glycerolem. Kapilára musí svírat s trubicí 6 pravý úhel, kterého dosáhneme např. ohnutím konce trubice s kapilárou podle pravoúhlých hran stojanové desky. Konec kapiláry lehce otavíme tak, aby nedošlo k zúžení otvoru, které by mohlo způsobit nežádoucí turbulenci vytékající barevné proudnice. Láhev 1 uzavíráme zátkou 10 s trubicí 6 zvláště opatrně, abychom nepoškodili zakončení kapiláry, které by zmařilo pozorování. Po uzavření láhve musí kapilára směřovat do středu otvoru tubusu 2 nebo jím procházet.

Pozorovací trubicí 3 zasuneme do otvoru pryžové zátky namazaného rovněž glycerolem. Zátku posuneme užším průměrem až k rozšířené části pozorovací trubice. Rozšíření trubice je přizpůsobeno myšlenému tvaru proudnic vtékajících do trubice a má zamezit turbulenci, která by nastala na neupravených hranách vtokového otvoru. Na výtokový konec trubice navlékneme hadici s tlačkou 4. Polohu aparatury upravíme tak, aby hadice s tlačkou 4 byla nad výlevkou. Pak zasuneme pozorovací trubicí otáčením do tubusu 2 láhve 1 až dosáhneme asi 2 cm přesahu kapiláry za nerozšířenou část. Souosou polohu kapiláry a pozorovací trubice dosáhneme buď změnou polohy pozorovací trubice podložním nebo vhodným stlačením pryžové zátky 10. Souosá poloha je velmi důležitá pro průběh pozorování a měření a její úpravě je třeba věnovat potřebnou péči. Je třeba zkontrolovat také nepoškozený konec kapiláry.

Po kontrole geometrie aparatury napouštíme vodu do dekantačního válce 7 při uzavřené tlačce 4 a současně plníme láhev 1 při otevřeném odvzdušňovacím otvorem v zátce 10 až se v něm objeví voda. Pak odvzdušňovací otvor uzavřeme zátkou nebo kohoutem a po dosažení hladiny vody úrovně přepadu 8 v dekantačním válci zavřeme přívod vody.

Před naplněním dělicí nálevky 9 přibližně 0,02 M roztokem  $\text{KMnO}_4$  je třeba odvzdušnit přívodní hadici a trubicí. Sloupec vzduchu prakticky znemožňuje tok roztoku manganistanu a tím i měření. Odvzdušnění dosáhneme buď snížením dělicí nálevky uložené v kruhu co nejvíce pod úroveň přepadu 8 na

dekantačním válci, nebo připojením nalévacího otvoru dělicí nálevky na zdroj podtlaku. Odvzdušnění je ukončeno zvýšením hladiny vody nad kohout dělicí nálevky. Pak dělicí nálevku naplníme roztokem  $\text{KMnO}_4$  a umístíme ji ve stojanu výše než je hladina přepadu 8.

Případný sloupec vzduchu v pozorovací trubici 3 vypudíme otevřením tlačky 4. Současným otevřením kohoutu dělicí nálevky 9 a tlačky 4 napustíme roztok  $\text{KMnO}_4$  až do vyústění kapiláry. Pak tlačku i kohout dělicí nálevky uzavřeme. Tím je aparatura připravena k měření.

Při pozorování charakteru proudění a měření měníme průtok vody otevíráním a přivíráním tlačky 4 v kritických okamžicích, kdy se mění laminární proudění v přechodové a přechodové v turbulentní a naopak. Při každém nastavení průtoku tlačkou 4 měříme objem  $V$  proteklé vody jímaný v odměrném válci 5 za dobu  $\tau$ . Obě hodnoty zapíšeme do tabulky a uvedeme v ní i pozorovaný charakter proudění, který označíme při zvyšování průtoků znaménkem +, při snižování znaménkem – a písmeny l- laminární, p- přechodové a t- turbulentní.. Měříme aspoň pětkrát při zvyšování průtoku a pětkrát při jeho snižování. Během měření nezapomeneme změřit teplotu vody a zapsat ji do záhlaví tabulky spolu s hodnotami hustoty a dynamické viskozity nalezenými v tabulkách. Přívod roztoku manganistanu je třeba seřizovat tak, aby jen zřetelně označoval proudnici a nepřekročil rychlost vody proudící pozorovací trubicí. V opačném případě by docházelo ke zvlnění proudnice a chybnému posouzení charakteru proudění. Při posuzování charakteru proudění je rozhodující pozorování barevné proudnice ve vzdálenosti 5 až 20 cm od vyústění kapiláry, kdy už je tok uklidněný i při větších průtocích. Během měření stále kontrolujeme a seřizujeme mírný přepad vody 8, který je nutný k zabezpečení konstantního nastaveného průtoku pozorovací trubicí.

Kritické Reynoldsovo číslo se snažíme zjistit u co největšího počtu pozorovacích trubic v uvedené četnosti, abychom měli dostatek podkladů pro statistické zpracování výsledků.

#### ***Vyhodnocení výsledků měření:***

Změřené a vypočtené hodnoty podle rov.(2) zapíšeme do tabulky:

Pozorování charakteru proudění a hodnoty kritických Reynoldsových čísel pro pozorovací trubicí průměru  $d = 17,0$  mm, vodu o teplotě  $10,0$  °C, hustotě  $999,7$   $\text{kg m}^{-3}$  a dynamické viskozitě  $1,3039$  mPa s

Poř. čís.	$\tau$ s	V ml	v $\text{m s}^{-1}$	Re 1	charakter proudění
1	14,0	210	0,11	860	+ l
15	10,4	375	0,27	2071	- t

Z kritických hodnot Reynoldsových čísel (pro konec laminární a počátek přechodové a pro konec přechodové a počátek turbulentní oblasti) vypočteme aritmetické středy a směrodatné odchylky.

***Diskuse výsledků:***

Všimneme si, zda jsou hodnoty Re pro různé průměry trubíc stejné nebo na nich závisí a do jaké míry se shodují se shora uvedenými literárními hodnotami.

***Kontrolní otázky:***

1) Definujte Reynoldsovo číslo a uveďte jeho význam pro operace chemického průmyslu.

2) Vypočtete hodnotu Reynoldsova čísla pro kapalinu o hustotě  $1020 \text{ kg m}^{-3}$ , dynamické viskozitě  $3,00 \text{ mPa s}$  proudící rychlostí  $3 \text{ m s}^{-1}$  potrubím o vnitřním průměru  $50 \text{ mm}$  a určete oblast proudění.

3) Nakreslete rozdělení rychlosti proudění tekutin v průřezu potrubí při laminárním a turbulentním proudění.

4) Odvoďte výraz pro výpočet Reynoldsova čísla ze změřeného průměru potrubí  $d$ , objemu proteklé kapaliny  $V$  za čas  $\tau$  a dalších potřebných veličin.

5) Které zásady musíte respektovat při sestavování aparatury pro pozorování charakteru proudění a výpočet kritických hodnot Re? K vysvětlení použijte uvedeného obrázku. Jak ovlivňuje dodržení zásad úspěšnost pozorování a výpočty kritických hodnot Re?

