

4 Ztráty tlaku v trubce s výplní

Miloslav Ludvík, Milan Jahoda

I Základní vztahy a definice

Proudění kapaliny či plynu nehybnou vrstvou částic má řadu aplikací v chemické technologii. Částice tvořící vrstvu mohou být kuličky, válečky, granulovaný materiál či speciální výplňová tělíska, používaná v zařízeních pro sdílení hmoty (absorpční, desorpční či rektifikační kolony). Jako kulové částice se vyrábějí ionexové polymery, používané k přípravě demineralizované vody, podobu válečků či kuliček mají např. katalytické materiály obsažené v některých typech reaktorů. V průmyslových zařízeních je množství zpracovávaného plynu či kapaliny (tj. výkon zařízení) limitováno na jedné straně výkonem stroje na jejich dopravu a na straně druhé tlakovou ztrátou - hydraulickým odporem zařízení. Pro jejich navržení a provozování je důležitá závislost tlakové ztráty na toku média zařízením a ostatních faktorech, ke kterým patří mezerovitost vrstvy, velikost, tvar a orientace částic, hustota a viskozita protékajícího média.

Mezerovitost vrstvy je definovaná vztahem

$$\varepsilon = \frac{V_f}{V_B} = \frac{V_B - V_P}{V_B} \quad (4-1)$$

kde V_B je objem vrstvy, V_f je objem tekutiny ve vrstvě, V_P je objem částic ve vrstvě. Další charakteristikou vrstvy je měrný (specifický) povrch výplně

$$a = \frac{A}{V_B} \quad (4-2)$$

kde A je povrch částic tvořících vrstvu o objemu V_B . Charakter proudění tekutiny ve vrstvě částic je dán hodnotou modifikovaného Reynoldsova kritéria

$$Re_p = \frac{\nu d_{p,ek} \rho}{\eta} \quad (4-3)$$

kde ν je mimovrstvová rychlost vypočtená z objemového průtoku tekutiny \dot{V}_f a příčného průřezu trubky S .

$$\nu = \frac{\dot{V}_f}{S} \quad (4-4)$$

Ekvivalentní rozměr částice $d_{p,ek}$ v rovnici (4-3) vypočteme podle vztahu

$$d_{p,ek} = \frac{6(1-\varepsilon)}{a} \quad (4-5)$$

přičemž ekvivalence je definována tak, že poměr povrchu všech částic ve vrstvě ku jejich objemu je stejný jako poměr povrchu a objemu koule o průměru d_p . Pro částici kulového tvaru se tak $d_{p,ek}$ rovná jejímu průměru.

Pro tlakovou ztrátu ve vrstvě náhodně uložených (nasypaných) částic, které nemají ot-

vory či výrazně nepravidelné tvary (kulové částice apod.), je často používaným vztahem Ergunova rovnice. V rovnici je celková tlaková disipativní ztráta na jednotkové výšce vrstvy součtem ztráty vazkým třením a turbulentní disipací energie

$$\frac{\Delta p_{\text{dis}}}{h} = k_1 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\eta \nu}{d_p^2} + k_2 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho \nu^2}{d_p} \quad (4-6)$$

kde k_1, k_2 jsou empirické koeficienty. Rovnici (4-6) lze uvést do bezrozměrného tvaru

$$f_v = k_1 + k_2 \frac{Re_p}{1-\varepsilon} \quad (4-7)$$

kde f_v je modifikovaný součinitel tření (podíl celkové tlakové ztráty a členu definujícího ztrátu energie ve viskozni oblasti toku). Tento součinitel je definován vztahem

$$f_v = \frac{\Delta p_{\text{dis}}}{h} \frac{d_p^2}{\eta \nu} \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)^2} \quad (4-8)$$

Empirické konstanty k_1, k_2 mohou být stanoveny lineární regresní analýzou závislosti (4-7). Tato závislost má univerzální platnost pro laminární, přechodný a turbulentní režim toku tekutiny.

Pro vrstvu částic, která má propojené kanálky mezi částicemi, např. sypaná vrstva výplňových tělísek pro kolonové aparáty (Raschigovy či Pallovy kroužky apod.) je charakter toku spojitě fáze složitý a nelze jej popsat zákonitostmi toku soustavou rovnoběžných kanálků. V těchto případech se doporučuje pro tlakovou ztrátu empirická rovnice

$$\Delta p_{\text{dis}}/h = k_1 F_f^{k_2} \quad (4-9)$$

kde k_1, k_2 jsou empirické konstanty, přičemž $k_2 \rightarrow 2$, jak plyne z definice ztrátové výšky v Bernoulliho rovnici. Ve vztahu (4-9) F_f je intenzitní faktor pro kapalinu, definovaný vztahem

$$F_f = \nu \rho^{0,5} \quad (4-10)$$

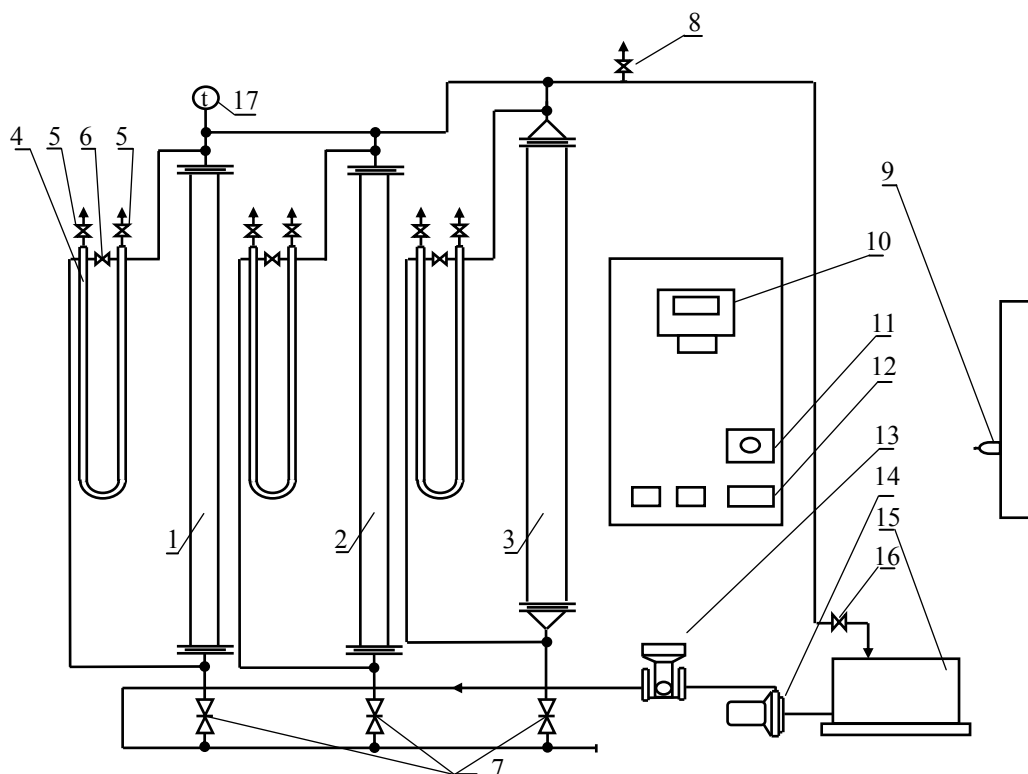
kde ν je mimovrstvová rychlost kapaliny.

II Cíl práce

1. Proměření závislosti tlakové ztráty na objemovém toku kapaliny pro dvě zadané trubky.
2. Regresní analýzou vyhodnotit konstanty k_1, k_2 ; rov.(4-7) a (4-9).
3. Zakreslení grafů závislostí.

III Popis zařízení

Na obr. 4-1 je uvedeno schéma zařízení. Voda z nádrže **15** se čerpá čerpadlem **14** přes průtokoměr **13** do trubek obsahujících výplň **1** až **3**. Čerpadlo se spouští spínačem **11**. K průtokoměru je připojen měřicí díl **10** obsahující digitální stupnici průtoků ν l s⁻¹. Výplň v trub-



Obr. 4.1 Zařízení pro měření tlakové ztráty při proudění výplně

- | | | |
|------------------------------------|----------------------------------|---------------------|
| 1 až 3 trubky s výplní: | 7 uzavírací a regulační šoupata | 14 čerpadlo |
| 1 - keramické Raschigovy kroužky | 8 odvzdušňovací ventil aparatury | 15 nádrž s vodou |
| 2 - skleněné kuličky | 9 spínač pro el. panel zařízení | 16 uzavírací ventil |
| 3 - plastové Pallovy kroužky | 10 zobrazení průtoku kapaliny | 17 teploměr |
| 4 diferenční manometr pro trubku 1 | 11 spínač motoru čerpadla | |
| 5 odvzdušňovací ventily manometru | 12 zásuvka motoru čerpadla | |
| 6 zkratovací ventil | 13 průtokoměr | |

kách je zdola i shora omezena děrovaným roštem. Průtok vody se reguluje šoupaty 7, sloužícími rovněž k uzavření dané sekce, pokud se na ní neměří. Tlakový rozdíl vznikající při průtoku vody vrstvou výplně se měří diferenčními manometry, které jsou trvale připojeny k tlakovým vývodům na odpovídající trubce (nejsou zde uzavírací ventily). Každý manometr je osazen zkratovacím ventilem a dvěma odvzdušňovacími ventily. V horní levé části aparatury je umístěn teploměr 17. Tlak v zařízení lze při odvzdušňování manometrů zvýšit přivřením ventilu 16 na vratném potrubí do zásobní nádrže. Při měření je tento ventil plně otevřen. Elektrické napětí do panelu aparatury se přivádí spínačem 9 na panelu na boční zdi vpravo od zařízení.

IV Postup práce

IV.1 Příprava zařízení k měření

Nejdříve zkontrolujeme, zda-li je zcela otevřený uzavírací ventil 16, otevřeny zkratovací ventily na všech manometrech, uzavřena šoupata 7 před každou trubkou, uzavřen odvzduš-

ňovací ventil **8** a uzavřeny odvzdušňovací ventily všech manometrů. Zkontrolujeme, že svítí displej průtokoměru **10**. Před začátkem měření musíme provést *odvzdušnění měřené trubky a připojeného manometru*. Spustíme čerpadlo spínačem **11**. Pozvolným otevíráním šoupěte **7** před zadanou trubicou dosáhneme jejího odvzdušnění (nejsou patrné bublinky vzduchu v proudu kapaliny procházející trubicou). Rozdíl hladin měřící kapaliny v manometru nebude významný díky otevřenému zkratovacímu ventilu. Po odvzdušnění měřené trubky odvzdušníme připojený manometr. Šoupě **7** před měřenou trubicou je otevřené, kapalina proudí přes vrstvu výplně, odvzdušňovací ventily jsou zavřené, zkratovací ventil manometru je zcela otevřený a manometrická kapalina nevykazuje žádný podstatný rozdíl hladin. Zvolna otevřeme odvzdušňovací ventily a pozorujeme, zda-li nedochází k náhlému nárůstu rozdílu hladin manometrické kapaliny. Pokud ano, odvzdušňovací ventily ihned uzavřeme a zavoláme instruktora. Při odvzdušňování manometru odchází část kapaliny přes odvzdušňovací ventily do boku zásobní nádrže **15**. Odvzdušnění je úplné, pokud již nejsou patrné procházející bublinky vzduchu v odvzdušňovacím potrubí. Po odvzdušnění nejprve uzavřeme odvzdušňovací ventily, pak šoupě **7** a nakonec zkratovací ventil. Trubka s výplní s připojeným manometrem je připravena k měření.

IV.2 Měření tlakové ztráty na trubicích s výplní

Tlakovou ztrátu vypočítáme z naměřených hodnot Δh na diferenčním manometru. Je zapotřebí získat 20 hodnot v rozpětí od 15 mm do maximálně možné hodnoty na daném manometru. Současně zapisujeme příslušný průtok kapaliny zobrazovaný na panelu průtokoměru. Průtok kapaliny nastavujeme šoupětem před měřenou trubicou. Hodnoty odečítáme po jejich ustálení při změně průtoku.

IV.3 Zakončení práce

Po skončení měření odečteme teplotu vody a hodnotu zapíšeme do protokolu. Uzavřeme všechna šoupata **7** a otevřeme zkratovací ventil u měřené trubky. Pokud budeme pokračovat s měřením další trubky, postupujeme stejně, jak bylo popsáno v části IV.1 a IV.2, tj. před vlastním měřením odvzdušníme trubicu a připojený manometr. Při celkovém ukončení práce vypneme čerpadlo spínačem **11** a zavřeme všechna šoupata **7**. Do protokolu zapíšeme hustoty manometrické kapaliny. Předáme zařízení instruktorovi a necháme si podepsat protokol.

V Bezpečnostní opatření

1. Průtok kapaliny zvyšujeme opatrně, aby nedošlo k vyplavení měřící kapaliny z diferenčních manometrů.
2. Manometry odvzdušňujeme zásadně při otevřeném zkratovacím ventilu postupným otevíráním odvzdušňovacích ventilů.

VI Zpracování naměřených hodnot

VI.1 Trubka s výplní kuliček

Pro výplň tvořenou kuličkami nejprve vypočítáme hodnoty mezerovitosti a měrný povrch výplně. Vycházíme přitom z údajů uvedených v datovém formuláři (průměr trubky a kuliček, počet kuliček). Objem kuliček je dán vztahem

$$V_p = n \frac{\pi d_p^3}{6} \quad (4-11)$$

kde n je počet kuliček. Pro povrch částic platí

$$A = n \pi d_p^2 \quad (4-12)$$

Dosadíme-li vztahy (4-11) a (4-12) do definičních vztahů (4-1), (4-2) s tím, že objem vrstvy je roven $V_B = h \pi d^2 / 4$, obdržíme

$$\varepsilon = 1 - \frac{2 n d_p^3}{3 d^2 h} \quad (4-13)$$

$$a = \frac{4 n d_p^2}{d^2 h} \quad (4-14)$$

Objemový tok přepočítáme na mimovrstvovou rychlost pomocí vztahu (4-4) a dosadíme do Reynoldsova čísla (4-3). Ze vztahu (4-8) vyčíslíme modifikovaný součinitel tření a pro získaný soubor hodnot $\left[\frac{Re_p}{1 - \varepsilon}, f_v \right]$ vyhodnotíme pomocí vhodného matematického programu lineární regresní analýzou konstanty vztahu (4-7). Hodnoty tlakové ztráty vypočítáme z naměřených hodnot čtení na manometru Δh pomocí vztahu (4-15). Věnujte pozornost správné hodnotě hustoty manometrické kapaliny ρ_m . Regresní přímku s experimentálními hodnotami vytiskneme.

$$\Delta p_{dis} = \Delta h (\rho_m - \rho) g \quad (4-15)$$

VI.2 Trubka s vrstvou nekulových částic

Z naměřených hodnot objemového toku vyčíslíme intenzitní faktor ze vztahu (4-10). Této nezávislé proměnné přiřadíme hodnoty měrné tlakové ztráty vypočtené z rovnice (4-15) a pomocí vhodného matematického programu vyhodnotíme regresní analýzou konstanty k_1, k_2 ve vztahu (4-9). Regresní křivku s experimentálními hodnotami vytiskneme.

VII Symboly

a	měrný povrch výplně (vztaženo k objemu vrstvy)	m^{-1}
$d_{p,ek}$	ekvivalentní průměr částice	m
f_v	modifikovaný součinitel tření	
F_f	intenzitní faktor	$m s^{-1} (kg m^{-3})^{0,5}$
h	výška vrstvy výplně	m

k_1, k_2 regresní konstanty ve vztazích (4-7) a (4-9)

n počet částic

Re_p modifikované Reynoldsovo kritérium

S příčný průřez trubkou

m^2

VIII Kontrolní otázky

1. Co je to mezerovitost vrstvy a jak její hodnota ovlivňuje ztrátu tlaku při proudění tekutiny výplní?
2. Jak se na zařízení měří mimovrstvová střední rychlost tekutiny?
3. Jak se měří tlaková ztráta a na čem závisí citlivost použitého přístroje?
4. Jaká technologická zařízení modeluje aparatura v laboratoři? Uveďte příklady!