Práca č. 6

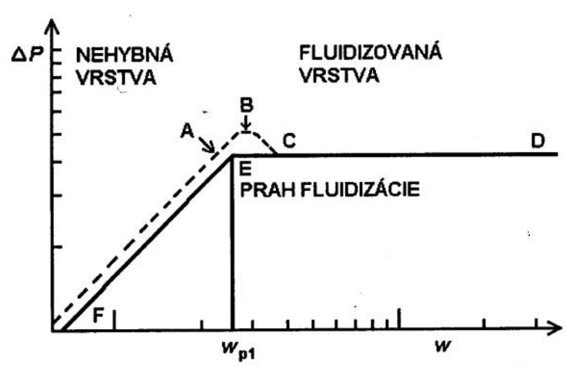
Fluidizovaná vrstva tuhé častice - kvapalina

Cieľ práce:
Na laboratórnom zariadení určiť vlastnosti nehybnej a vodou fluidizovanej vrstvy tuhých častíc, ktoré sú potrebné pri návrhu a prevádzke priemyselných zariadení. Stanovované vlastnosti sú:

1. Strata tlaku pri prietoku kvapaliny cez nehybnú aj fluidizovanú vrstvu.
2. Prahová rýchlosť fluidizácie.
3. Závislosť medzi výškou fluidizovanej vrstvy a rýchlosťou fluidizujúcej kvapaliny.

Teoretická časť
Pri zväčšovaní prietoku tekutiny prúdiacej vo vertikálnej kolóne zdola nahor cez vrstvu tuhých častíc dôjde pri určitom prietoku k stavu, keď sa pôvodne nehybné častice začnú pohybovať. Tento stav sa nazýva fluidizácia tuhých častíc. Sila odporu, ktorou tekutina pôsobí na tuhé častice, sa vyrovnala s efektívnou tiažou častíc (tiažová sila zmenšená o vztlakovú silu).
Pri ďalšom zväčšovaní prietoku tekutiny sa častice vzďaľujú od seba a objem fluidizovanej vrstvy sa zväčšuje. Hovoríme, že vrstva expanduje. Keďže efektívna tiaž vrstvy častíc je konštantná, musí byť aj sila odporu pôsobiaca na častice stála. Vyplýva to z bilancie síl vo fluidizovanej vrstve. Pri zväčšujúcom sa prietoku tekutiny sa to dá dosiahnuť iba tak, že sa zväčšujú vzdialenosti medzi časticami. Tým sa zväčšuje aj voľný prierez, ktorý je k dispozícii pre tok tekutiny vo vrstve.
Tuhé častice môžu byť vo fluidizovanej vrstve rozložené rovnomerne, vtedy hovoríme o rovnomerne fluidizovanej vrstve. Najčastejšie sa to v praxi dosahuje vtedy, keď fluidizačnou tekutinou je kvapalina. Ak fludizáciu robíme s plynnou fázou, často sa vytvára nerovnomerne fludizovaná vrstva, plyn prúdi cez vrstvu vo forme bublín, vytvárajú sa kanáliky a podobne.

Vplyv rýchlosti kvapaliny na stratu tlaku vo vrstve tuhých častíc
Na obr. 6.1 je uvedená typická závislosť straty tlaku vo vrstve tuhých častíc ako funkcie mimovrstvovej rýchlosti fluidizačnej kvapaliny.



Obr. 6.1: Závislosť straty tlaku vo vrstve od mimovrstvovej rýchlosti tekutiny

Obidve stupnice na grafe sú logaritmické! S rastúcim prietokom je závislosť lineárna až po bod A, kde začína expanzia vrstvy. Vrstva sa rozpína a strata tlaku dosahuje maximálnu hodnotu (B). S ďalej narastajúcim prietokom strata tlaku pomaly klesá až dosiahne približne konštantnú hodnotu, ktorá je nezávislá od rýchlosti kvapaliny (CD). Ak za tohto stavu začneme rýchlosť kvapaliny znižovať, nedostaneme sa do bodu B ale do bodu E v prípade, že rýchlosť kvapaliny je tak malá, že častice sa už prestali pohybovať – usadili sa. Vtedy má nehybná vrstva častíc maximálnu stabilnú medzerovitosť. Pri ďalšom znižovaní rýchlosti kvapaliny sa strata tlaku zmenšuje po čiare EF a je menšia, ako bola v počiatočnej vrstve pri rovnakej rýchlosti kvapaliny. Pri opätovnom zvyšovaní prietoku sa strata tlaku bude meniť po čiare FE. V bode E dôjde ku fluidizácii (prah fluidizácie) a vo fluidizovanej vrstve bude strata tlaku daná závislosťou ECD. Vtedy sa strata tlaku číselne rovná efektívnej tiaži vrstvy podelenej prierezom kolóny. Bod B leží nad čiarou CD, pretože v pôvodnej nehybnej vrstve stratu tlaku zväčšovali sily trenia medzi časticami počas rozpínania vrstvy.

Na výpočet straty tlaku pri prúdení kvapaliny cez nehybnú vrstvu tuhých častíc bola odvodená Ergunova rovnica, ktorá má tvar

$$\Delta P_n = \frac{Re}{Ar}\, L_0\, g\, (\rho_s - \rho) \left(150 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} + 1{,}75 \frac{Re}{\varepsilon^3} \right) \tag{6.1}$$

Význam symbolov v rovnici (6.1):

ΔP_n - strata tlaku v nehybnej vrstve častíc (Pa)

L_0 - výška tzv. kompaktnej vrstvy častíc, t. j. takej fiktívnej vrstvy, ktorú by vytvoril materiál častíc uložený v kolóne tak, že by medzi časticami neboli žiadne medzery. Túto veličinu je možné vypočítať z nasledujúceho vzťahu

$$L_0 = \frac{4\, m_s}{\rho_s \pi D^2} \tag{6.2}$$

m_s - celková hmotnosť tuhých častíc tvoriacich vrstvu (kg)

ρ_s - hustota tuhých častíc (kg.m^{-3})

ρ - hustota fluidizačnej kvapaliny (kg.m^{-3})

D - vnútorný priemer kolóny (m)

ε - medzerovitosť vrstvy častíc (1). Je definovaná ako objemový zlomok medzier vo vrstve

$$\varepsilon = 1 - \frac{L_0}{L} \tag{6.3}$$

L – výška nehybnej resp. fluidizovanej vrstvy častíc (m)

Ar – Archimedovo kritérium (1)

$$Ar = \frac{d_e^3 (\rho_s - \rho) \rho g}{\mu^2} \tag{6.4}$$

d_e – ekvivalentný priemer tuhých častíc vo vrstve (m)

$$d_e = \frac{\sum d_i^3}{\sum d_i^2} \tag{6.5}$$

Re – Reynoldsovo kritérium (1)

$$Re = \frac{d_e w \rho}{\mu} \tag{6.6}$$

μ – dynamická viskozita kvapaliny (Pa.s)
w – stredná mimovrstvová rýchlosť prúdenia kvapaliny (m.s^{-1})

$$w = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2} \tag{6.7}$$

$\dot{V}$ – objemový prietok kvapaliny (m^3.s^{-1})
g – gravitačné zrýchlenie (m.s^{-2})

Strata tlaku vo fluidizovanej vrstve sa určí z rovnováhy síl: odporu, ktorým pôsobí tekutina na častice, tiaže častíc a vztlaku pôsobiaceho na častice v kvapaline. Po úprave rovnice bilancie síl pôsobiacich na jednotkovú plochu prierezu kolóny dostaneme výraz

$$\Delta P = L_0(\rho_s - \rho)g \tag{6.8}$$

Prahová rýchlosť fluidizácie

Z obr. 6.1 je zrejmé, že pri prahu fluidizácie (bod E) je strata tlaku kvapaliny prúdiacej cez nehybnú vrstvu tuhých častíc rovnaká, ako strata tlaku vo fluidizovanej vrstve ΔP

$$\Delta P_n = \Delta P \tag{6.9}$$

Preto z rovníc (6.1) a (6.8) môžeme vypočítať hodnotu Reynoldsovho kritéria pri prahu fluidizácie Re_p, ak poznáme hodnotu medzerovitosti ε_p a Archimedovho kritéria. Tieto veličiny sú jednoznačne dané fyzikálnymi a geometrickými parametrami systému tuhé častice – kvapalina. Experimentálne bolo zistené, že medzerovitosť monodisperznej vrstvy guľových častíc pri prahu fluidizácie je približne 0,4. Z podmienky (6.9) potom dostaneme

$$Re_p = 25{,}7\left(\sqrt{1 + 5{,}53.\,10^{-5}\,Ar} - 1\right) \tag{6.10}$$

Z takto vypočítanej hodnoty Re_p potom prahová rýchlosť fluidizácie je

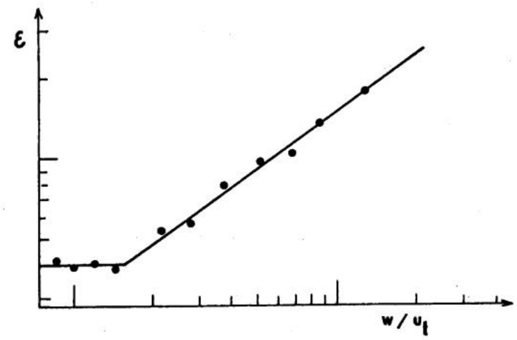
$$w_p = \frac{\mu\, Re_p}{\rho\, d_e} \tag{6.11}$$

Expanzia fluidizovanej vrstvy

Pre vrstvy fluidizované kvapalinou je charakteristické, že so zvyšujúcim sa prietokom kvapaliny expandujú rovnomerne od prahovej rýchlosti až po maximálnu hodnotu rovnú ustálenej pádovej rýchlosti častice v danej kvapaline u_t. Po prekonaní tejto maximálnej rýchlosti už dochádza k úletu častíc z fluidizovanej vrstvy a hovoríme o prahu úletu. Mierou expanzie fluidizovanej vrstvy je jej medzerovitosť ε. Nech je tiež bezrozmerovou mierou rýchlosti prúdenia kvapaliny pomer mimovrstvovej rýchlosti w k pádovej rýchlosti častice u_t. Ak graficky znázorníme experimentálne údaje ε od pomeru w/u_t v grafe s obidvomi stupnicami logaritmickými, dostaneme dve pretínajúce sa priamky (obr. 6.2). Pri malých rýchlostiach je medzerovitosť konštantná a táto priamka odpovedá nehybnej vrstve častíc. Pre fluidizovanú vrstvu je táto závislosť tiež lineárna a teda ju môžeme vyjadriť vzťahom

$$\frac{w}{u_t} = \varepsilon^n \tag{6.12}$$

Rovnica (6.12) sa nazýva aj expanzná rovnica. Hodnota exponentu n závisí od vlastností tuhých častíc aj kvapaliny a vo väčšine prípadov sa musí stanovovať experimentálne.



Obr. 6.2: Závislosť medzerovitosti vrstvy od relatívnej rýchlosti tekutiny.

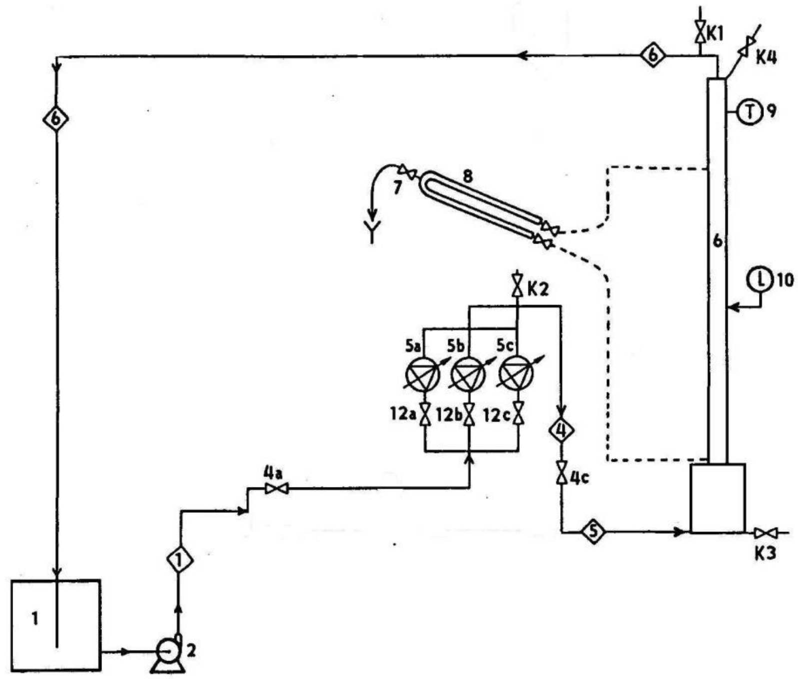
Zadanie práce

1. Zistite medzerovitosť vrstvy tuhých častíc ε_p pri prahu fluidizácie, ak hmotnosť tuhých častíc v kolóne je m_s= .... kg a priemer kolóny je *D*= m.
2. Namerajte závislosť $\Delta P_n = f_1(w)$ pre nehybnú vrstvu častíc, závislosť $\Delta P = f_2(w)$ pre fluidizovanú vrstvu častíc a $\varepsilon = f_3\left(\frac{w}{u_t}\right)$ pre obidve vrstvy. Uvedené závislosti, experimentálne aj vypočítané, zobrazte na grafoch s obidvomi logaritmickými stupnicami.
3. Určte hodnotu prahovej rýchlosti fluidizácie dvomi spôsobmi a porovnajte získané výsledky:
   a) graficky, z nameraných závislostí straty tlaku od rýchlosti kvapaliny v nehybnej a fluidizovanej vrstve, $w_{p\ exp}$
   b) výpočtom z rovnice (6.10) a (6.11), $w_{p\ vyp}$.
4. Z nameraných údajov závislosti $\varepsilon = f_3\left(\frac{w}{u_t}\right)$ vypočítajte hodnotu exponentu *n* v rovnici (6.12).

EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Opis zariadenia

Schéma zariadenia na fluidizáciu tuhých častíc vodou je uvedená na obr. 6.3. Zo zásobnej nádrže 1 sa voda dopravuje čerpadlom 2 cez potrubie 1 do rotametrov 5a, 5b, 5c, kde sa meria a nastavuje jej prietok pomocou regulačných ventilov 12a, 12b, 12c. Potom voda prúdi potrubím 4 a 5 do fluidizačnej kolóny 6. Voda z kolóny preteká potrubím 6 nazad do zásobnej nádrže 1. Ku kolóne 6 je pripojený diferenčný U manometer 8 so sklonenými ramenami, ktorým sa merajú straty tlaku vo vrstve. Výška hladiny fluidizovanej vrstvy sa meria meračom 10. Teplota prúdiacej vody v kolóne sa meria teplomerom 9. Cez kohút K4 sa do kolóny 6 nasypú tuhé častice a ventil 7 slúži na odvzdušnenie U manometra.



Obr. 6.3: Schéma zariadenia na fluidizáciu tuhých častíc.

Pracovný postup

1)Príprava zariadenia na meranie

1. Oboznámime sa s reálnym zariadením podľa priloženej dokumentácie, skontrolujeme jeho úplnosť, oboznámime sa so zadaním práce a počkáme na súhlas vedúceho cvičenia na začatie práce.
2. Skontrolujeme stav vody v zásobnej nádrži 1. V prípade nedostatku vody ju doplníme z vodovodu.
3. Nasypeme tuhé častice do kolóny (ak tam už sú, tento bod preskočíme). V kolóne 6 znížime hladinu vody pod úroveň kohúta K4. Urobíme to pri vypnutom čerpadle 2 otvorením ventilu 12c. Keď je hladina vody v kolóne 6 dostatočne nízko, zavrieme ventil 12c a tým sa vytekanie vody z kolóny zastaví. Potom otvoríme kohút K4. Pomocou lievika nasypeme do kolóny odvážené množstvo tuhých častíc a následne uzavrieme kohút K4. Zapneme čerpadlo a pomaly zvyšujeme prietok vody do kolóny.
4. Pred začiatkom merania musíme odvzdušniť fluidizačnú kolónu 6 ako aj diferenčný manometer 8. Kolónu a potrubné trasy odvzdušníme tak, že pri zapnutom čerpadle 2 postupne otvárame ventily 12a, 12b a 12c a púšťame dostatočne veľký prietok vody celým systémom. Dávame pritom pozor, aby nedošlo k úletu tuhých častíc z kolóny.
5. Po odvzdušnení potrubí a fluidizačnej kolóny pristúpime k odvzdušneniu U manometra. Za tým účelom otvoríme ventil 7 a necháme vodu pretekať cez obidve ramená manometra von do výlevky. Skontrolujeme aj prívodné hadice k manometru, ktoré sú priehľadné a aj vizuálne môžeme zistiť, či v nich nie sú vzduchové bubliny. Potom uzavrieme prívod vody do kolóny 6 a cez hadičku pri otvorenom ventile 7 nafúkneme vzduch zhruba do polovice ramien manometra 8. Kohút 7 potom zavrieme

a po ustálení hladín odčítame na manometri pri nulovom prietoku vody počiatočný rozdiel hladín Δh_0 a zaznamenáme si túto hodnotu.

6. Celým systémom necháme pretekať vodu cca 10 minút, aby sa v zariadení ustálila teplota. Po ustálení zmeriame teplotu vody teplomerom 9.

2) Meranie

1. Po odvzdušnení si najprv musíme namerať dva dôležité prietoky – prahový a maximálny. Prahový prietok experimentálne nameriame tak, že najprv nastavíme vyšší prietok vody do kolóny tak, aby častice fluidizovali. Následne prietok pomaly znižujeme až do momentu, keď sú všetky častice nehybné. Nameranú výšku hladiny tuhých častíc v kolóne ako aj príslušný objemový prietok vody si zaznamenáme do tabuľky 6.1. Meranie urobíme 3-krát, aby sme zmenšili chybu merania. Nakoniec zo všetkých meraní vypočítame aritmetický priemer, čím získame hodnoty výšky hladiny nehybnej vrstvy častíc L_pa objemového prietoku vody pri prahu fluidizácie $\dot{V}_p$
2. Maximálny objemový prietok vody do kolóny $\dot{V}_{max}$ určíme tak, aby pri tomto prietoku nedošlo k prílišnej turbulencii hladiny fluidizovanej vrstvy, aby bola dobre merateľná jej výška.
3. Pomocou prahového a maximálneho prietoku si urobíme rozvrh meraní. Od nulového prietoku po prahový je treba urobiť 10 meraní a od prahového po maximálny tiež 10 meraní. Pri každom meraní nastavíme zvolený prietok vody, necháme proces ustáliť a následne zmeriame výšku hladiny vrstvy tuhých častíc L a stratu tlaku na U manometri Δh. Je potrebné, aby prietoky boli v uvedených intervaloch zvolené približne rovnomerne. Prietok vody určujeme z kalibračných grafov rotametrov, ktoré sú súčasťou dokumentácie ku práci.
4. V prípade, že hladiny vody v ramenách manometra kmitajú, urobíme príslušné meranie aspoň 2-krát a do tabuľky nameraných údajov 6.1 zapíšeme strednú hodnotu.
5. Na stanovenie ekvivalentného priemeru tuhých častíc d_e vyberieme priemery 50 častíc pomocou tabuľky náhodných čísel, ktorá je súčasťou dokumentácie. Priemery častíc nemeriame, ale odpíšeme ich z tabuľky priemerov častíc danej vzorky, ktorá je tiež v dokumentácii k práci. Získané hodnoty zapíšeme do tabuľky 6.2.

Ukončenie merania

Po ukončení meraní ešte raz odmeriame teplotu vody v kolóne 6 teplomerom 9. V prípade, že sa líši od teploty nameranej na začiatku práce, vypočítame strednú hodnotu. Uzavrieme ventily 12a, 12b a 12c a vypneme čerpadlo.

Bezpečnostné opatrenia

Ak na celom systéme vznikne nejaká porucha (napr. netesnosť) ihneď vypneme čerpadlo a uzavrieme všetky ventily. Poruchu ohlásime vedúcemu cvičenia.

SPRACOVANIE NAMERANÝCH ÚDAJOV

1. Vypočítame ekvivalentný priemer tuhých častíc podľa vzťahu (6.5).
2. Vypočítame výšku fiktívnej vrstvy L_0 z rovnice (6.2), prahovú medzerovitosť ε_p z rovnice (6.3), Archimedovo kritérium *Ar* (6.4) a hodnotu ustálenej pádovej rýchlosti tuhých častíc u_t vo vode (*pozri Práca č. 5*).

3. Z nameraných údajov v tabuľke 6.1 vypočítame pre každé meranie nasledujúce experimentálne hodnoty veličín: mimovrstvovú rýchlosť prúdenia vody (6.7), medzerovitosť vrstvy ε (6.3), stratu tlaku pre merania v nehybnej vrstve ΔP_n aj vo fluidizovanej vrstve zo vzťahu
$$\Delta P = (\Delta h - \Delta h_0).\rho.g.sin\alpha$$
kde α je uhol sklonu U manometra, Δh je nameraný rozdiel hladín manometra, Δh_0 je rozdiel hladín nameraný po odvzdušnení manometra pri nulovom prietoku vody. Výsledky zapíšeme do tabuľky 6.3.
4. Z takto získaných experimentálnych údajov vypočítajte parametre mocninovej závislosti $\Delta P_n = a_1 w^{b1}$ pre nehybnú vrstvu a $\Delta P = a_2 w^{b2}$ pre fluidizovanú vrstvu. Výpočet urobte najprv tak, že logaritmovaním zlinearizujete uvedené závislosti a následne aplikujete metódu najmenších štvorcov. Rovnaký výpočet urobte bez logaritmovania a síce aplikáciou nelineárnej optimalizácie parametrov. Na tento účel je vhodné použiť nástroj *Riešiteľ* v MS Excel. Porovnajte výsledky výpočtov napr. podľa veľkosti sumy štvorcov odchýlok.
5. Zostrojte graf, ktorý bude mať obidve osi logaritmické. V ňom bodmi (symbolmi) znázorníte Vami namerané experimentálne hodnoty ΔP_n resp. ΔP ako funkciu *w* a čiarou (bez bodov) obidve mocninové závislosti z bodu 4. Do toho istého grafu zakreslite čiarou inej farby (alebo čiarkovanou čiarou) závislosť (6.1) pre nehybnú a závislosť (6.8) pre fluidizovanú vrstvu.
6. Z priesečníka mocninových závislostí v grafe odčítajte hodnotu prahovej rýchlosti fluidizácie $w_{p\ exp}$ a straty tlaku $\Delta P_{p\ exp}$.
7. Vypočítajte hodnotu prahovej rýchlosti fluidizácie $w_{p\ vyp}$ z rovníc (6.10) resp. (6.11) a porovnajte ju s experimentálnou hodnotou $w_{p\ exp}$. Vypočítajte relatívnu odchýlku.
8. Hodnoty ε a w/u_t vypočítané z nameraných údajov zobrazte (ako experimentálne body) v grafe $\frac{w}{u_t} = f(\varepsilon)$, ktorý má obidve osi logaritmické. Vypočítajte hodnotu exponentu do rovnice (6.12): n_0 pre nehybnú vrstvu a *n* pre fludizovanú vrstvu častíc. Získané regresné závislosti zobrazte tiež v tom istom grafe. Do protokolu treba uviesť získaný tvar expanznej rovnice (6.12) pre fluidizovanú vrstvu.
9. Konečné výsledky zosumarizujte v tabuľke 6.4.

Tabuľka 6.1: Záznam o meraniach

Vzorka častíc:		Materiál častíc:		$Ar =$	
$D =$ m		$\dot{V}_p =$ $m^3.s^{-1}$		$\dot{V}_{max} =$ $m^3.s^{-1}$	
$\rho_s =$ $kg.m^{-3}$		$\rho =$ $kg.m^{-3}$		$\mu =$ $Pa.s$	
$\Delta h_0 =$ m		$\alpha =$		$L_p =$ m	
$t_1 =$ $°C$		$t_2 =$ $°C$		$\bar{t} =$ $°C$	
Vrstva	***Meranie***	***Poloha plaváka***	$\dot{V}$	Δh	***L***
	číslo	***[mm]***	$[m^3.s^-]^1$	***[m]***	***[m]***
Nehybná	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
Fluidizovaná	11				
	12				
	13				
	14				
	15				
	16				
	17				
	18				
	19				
	20				

Tabuľka 6.2: Záznam o rozmeroch tuhých častíc a výpočet ekvivalentného priemeru.

n_i	d_i	d_i^2	d_i^3	n_i	d_i	d_i^2	d_i^3
	[mm]	*[mm²]*	*[mm³]*		*[mm]*	*[mm²]*	*[mm³]*
1				26			
2				27			
3				28			
4				29			
5				30			
6				31			
7				32			
8				33			
9				34			
10				35			
11				36			
12				37			
13				38			
14				39			
15				40			
16				41			
17				42			
18				43			
19				44			
20				45			
21				46			
22				47			
23				48			
24				49			
25				50			
SUMA	-			-	-		

$$d_e = \frac{\sum d_i^3}{\sum d_i^2} = \qquad mm$$

$$u_t = \qquad m.s^{-1}$$

Tabuľka 6.3: Záznam o výpočtoch

n_i	w	w/u_t	Re	$\Delta P_{n\,exp}$	$\Delta P_{n\,vyp}$ *(6.1)*	ΔP_{exp}	ΔP_{vyp} *(6.8)*	ε
-	[$m.s^{-1}$]	-		[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	-
1						-	-	
2						-	-	
3						-	-	
4						-	-	
5						-	-	
6						-	-	
7						-	-	
8						-	-	
9						-	-	
10						-	-	
11				-	-			
12				-	-			
13				-	-			
14				-	-			
15				-	-			
16				-	-			
17				-	-			
18				-	-			
19				-	-			
20				-	-			
	Linearizovaný výpočet parametrov				Nelineárna optimalizácia parametrov			
	a_1 =		a_2 =		a_1 =		a_2 =	
	b_1 =		b_2 =		b_1 =		b_2 =	
	n_0 =		n =		n_0 =		n =	

Tabuľka 6.4: Konečné výsledky meraní a výpočtov

Vzorka častíc:	m_s= kg	ρ_s = kg.m^{-3}	L_0= m	d_e = mm
L_p= m	ε_p =	$\Delta P_{p\ exp}$ = Pa	$\Delta P_{p\ vyp}$ = Pa	$\delta_{\Delta P}$ =
Ar =	u_t= m.s^{-1}	$w_{P\ exp}$ = m.s^{-1}	$w_{P\ vyp}$ = m.s^{-1}	δ_w =
Meraním určený tvar rovnice (6.12) pre expanziu fluidizovanej vrstvy: $\frac{w}{u_t} = \varepsilon$				

Otázky na diskusiu

1. Ako by ste počítali medzerovitosť vrstvy pri fluidizácii napr. v nádobe kónického tvaru ?
2. Vysvetlite rozdiel vo výsledku výpočtov parametrov a_i a b_i resp. n_0 a n linearizáciou a následnou metódou najmenších štvorcov resp. nelineárnou optimalizáciou. Ktoré z nich sú lepšie a prečo ?
3. Aké údaje by ste potrebovali na to, aby ste mohli zodpovedne navrhnúť čerpadlo na dopravu vody do fluidizačnej kolóny ?