

**UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO–TECHNOLOGICKÁ
KATEDRA CHEMICKÉ INŽENÝRSTVÍ**

**FLUIDACE VRSTEV ČÁSTIC
NENEWTONSKÝMI KAPALINAMI:**

vizualizace proudění a struktura vrstev částic.

Diplomová práce

Autor práce: Alexander Surý

Vedoucí práce: Ing. Bedřich Šiška, CSc.

2006

**UNIVERSITA OF PARDUBICE
FACULTY OF CHEMICAL TECHNOLOGY
DEPARTMENT OF CHEMICAL ENGINEERING**

**FLUDIZATION OF PARTICLE BEDS
IN NON-NEWTONIAN FLUIDS:**

**visual representation and structure of particle
beds.**

Thesis

Author: Alexander Surý

Supervisor: Ing. Bedřich Šiška, CSc.

2006

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Alexander SURÝ**
Studijní program: **M2802 Chemie a technická chemie**
Studijní obor: **Chemické inženýrství**

Název tématu: **Fluidace vrstev částic neneutonskými kapalinami:
vizualizace proudění a struktura vrstev částic.**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Doplněte literární rešerši fluidace vrstev částic neneutonskými kapalinami, vizualizačních metod proudění kapalin vrstvami částic a hodnocení struktury vrstev při fluidaci.
2. Zvolte systémy kapalina-částice pro studium struktury fluidní vrstvy a toku kapalin fluidní vrstvou v koloně obdélníkového průřezu ("dvourozměrné") tak, aby částice mohly vytvářet více vrstev za sebou. Jako modelové neneutonské kapaliny použijte vodné roztoky polymerů s různou mírou pseudoplasticity a elasticity.
3. Vyberte vhodné typy barviv pro vizualizaci proudění vrstvami částic s ohledem na co nejmenší změnu reologických vlastností použitých kapalin. Zvolte vhodnou geometrii distributoru toku barvicí kapaliny a jeho umístění na koloně s cílem rovnoměrného rozptýlení barvicí kapaliny při vstupu do fluidního prostoru kolony.
4. Pomocí videokamery zaznamenejte průběh expanze částic při fluidaci různými typy kapalin odlišujících se svými reologickými vlastnostmi. Popiště strukturu fluidní vrstvy a stanovte lokální rychlosti proudící kapaliny pomocí dostupných metod analýzy obrazu na vybraných záznamech průběhů expanze fluidní vrstvy. Diskutujte vliv reologických vlastností kapalin na průběh expanze a strukturu fluidní vrstvy. Výsledky experimentů využijte k popisu fluidní vrstvy pomocí zónového modelu.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam odborné literatury:

Vedoucí diplomové práce:

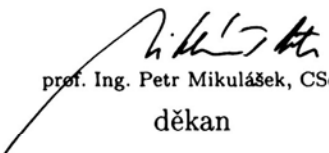
Ing. Bedřich Šiška, CSc.
Katedra chemického inženýrství

Datum zadání diplomové práce:

7. února 2006

Termín odevzdání diplomové práce:

12. května 2006


prof. Ing. Petr Mikulášek, CSc.

děkan

L.S.


doc. Ing. Zdeněk Palatý, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 7. února 2006

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č.121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla dle zákona § 60 ods. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla využila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 12. 5. 2006

Alexander Surý

Děkuji Ing. Bedřichu Šiškovi, CSc. a Ing. Miloslavu Simonovi za odborné vedení a poskytování rad při řešení diplomové práce. Dále pak svým rodičům a prarodičům za podporu ve studiu.

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá experimentálním studiem fluidace kulových částic newtonskými a neneutronskými (viskoelastickými) kapalinami v plouživé oblasti toku. Je studován vliv reologických vlastností kapalin na průběh expanze, lokální rychlosti proudící kapaliny a strukturu vrstev.

Teoretická část obsahuje základní poznatky z reologie, fluidace vrstev částic a její hodnocení, vizualizaci toku a analýzu obrazu.

Expanze vrstev částic byly sledovány v obdélníkové „dvourozměrné“ koloně o rozměrech 800 × 80 × 5mm. Vrstvy částic byly tvořeny monodisperzními kulovými částicemi s průměry 2,423; 2,010 a 1,460mm. Jako modelové kapaliny byly použity vodný roztok polyoxyalkylen glykolu a vodné roztoky polymeru hydroxyetylcelulózy a polyakrylamidu. Tokové vlastnosti kapalin byly měřeny na rotačním reometru HAAKE RS 150. Viskozitní funkce kapalin byly nahrazovány mocninovým a Carreauovým tokovým modelem.

Expanze vrstev byla zachycena digitální videokamerou. Vybrané videosekvence byly zpracovány a vyhodnoceny pomocí metod analýzy obrazu.

Ke studiu toku kapalin fluidní vrstvou, struktury fluidních vrstev a měření rychlostí kapaliny uvnitř fluidní vrstvy bylo také využito vizualizace toku pomocí obarvené modelové kapaliny.

Abstract

This thesis deals with experimental investigation of expansion of solid particle beds fluidized with Newtonian and non-Newtonian fluids in creeping flow regime. The influence of the rheological properties of fluids on expansion course, local velocity of the flowing fluid and structure of fluidized beds was investigated.

The theoretical part includes basic theory of rheology, fluidization of particle beds and its evaluation, flow visualization and image analysis.

The bed expansion was measured in the rectangular column with dimensions $800 \times 80 \times 5$ mm. The beds were composed of monodispersed spherical particles with diameters 2.423; 2.010 and 1.460mm. Water solution of polyoxyalcylen glycol, polymers of hydroxyethylcellulose and polyacrylamide were used as model fluids. The shear stress - shear rate data were measured on rotary rheometer HAAKE RS 150. Viscosity functions of fluids were expressed by the power law and the Carreau models.

The expansion of the beds was recorded by digital camera. Selected sequences of expansions were evaluated by means of image analysis methods.

The method of the flow visualization was developed for investigation of the liquid flow through particle fluidized beds, structure of fluidized beds, and for measuring of the fluid velocity inside the fluidized bed.

Obsah

1. Seznam symbolů	12
2. Úvod	15
3. Teoretická část	16
3.1 <i>Úvod do reologie</i>	16
3.1.1 Rozdělení tekutin.....	16
3.1.1.1 Dokonalá tekutina.....	17
3.1.1.2 Newtonská tekutina.....	17
3.1.1.3 Nenewtonská tekutina.....	17
3.1.2 Tokové modely tekutin.....	18
3.2 <i>Fluidace</i>	19
3.2.1 Základní pojmy.....	20
3.2.2 Fluidace newtonských tekutin.....	21
3.2.3 Fluidace nenewtonských tekutin.....	23
3.2.3.1 Rovnice expanze odvozené z kapilárního a buňkového modelu vrstvy.....	23
3.2.3.2 Rovnice expanze odvozené modifikací Richardson – Zakiho teorie fluidní vrstvy.....	24
3.2.3.3 Rovnice expanze odvozené z teorie podobnosti.....	24
3.2.3.4 Práhová rychlost fluidace.....	26
3.2.4 Homogenita a hodnocení fluidní vrstvy.....	27
3.2.4.1 Zónový model expanze fluidní vrstvy.....	28
3.3 <i>Vizualizace proudění kapalin vrstvami částic</i>	29
3.3.1 Optické metody.....	29
3.3.1.1 Vizualizace pomocí barviv.....	30
3.3.2 Fyzikální metody.....	31
3.4 <i>Analýza obrazu</i>	32
3.4.1 Snímání obrazu.....	33
3.4.1.1 Využití DV kamery.....	33
3.4.2 Předzpracování obrazu.....	34
3.4.3 Segmentace obrazu na objekty.....	35
3.4.4 Analýza objektů.....	35
4. Experimentální část	36
4.1 <i>Zařízení</i>	36
4.2 <i>Částice</i>	39
4.3 <i>Kapaliny</i>	39
4.4 <i>Popis měření</i>	39
5. Vyhodnocení dat	43
5.1 <i>Reologická data</i>	43
5.2 <i>Pádová rychlost</i>	43
5.3 <i>Expanze fluidní vrstvy</i>	44
5.4 <i>Zpracování a analýza obrazu</i>	45
5.4.1 Stanovení experimentální rychlosti uvnitř fluidní vrstvy.....	45
5.4.2 Mezerová rychlost.....	46

5.4.3 Zónový model.....	46
5.4.4 Hodnocení fluidní vrstvy pomocí „nejbližšího souseda“.....	53
6. Rozbor a diskuze výsledků.....	56
6.1 Experimentální zařízení.....	56
6.2 Expanze vrstev částic.....	56
6.3 Vizualizace vrstvy a analýza obrazu.....	57
6.4 Relativní vzdálenost částic ve vrstvě.....	58
7. Závěr.....	59
8. Literatura.....	61
9. Příloha.....	63

Seznam grafů, obrázků a tabulek

Seznam grafů

1. Expanzní křivka částic M.....	66
2. Expanzní křivka částic S.....	69
3. Expanzní křivka částic V.....	72
4. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém NA_M_MM.....	77
5. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém NA_S_MM.....	79
6. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém NA_V_MM.....	81
7. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém PR_M_MM.....	83
8. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém PR_S_MM.....	85
9. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém PR_V_MM.....	87
10. Sférický graf – hodnocení vzdáleností systému EM_V_6a.....	88
11. Sférický graf – hodnocení vzdáleností systému NA_V_3a.....	89
12. Sférický graf – hodnocení vzdáleností systému PR_V_4.....	90

Seznam obrázků

1. Zónový model.....	28
2. Technické schéma fluidační kolony.....	36
3. Schéma fluidační sestavy.....	37
4. Schéma rozložení otvorů nerezového distributoru.....	38
5. Reometr RS 150 RheoStress.....	38
6. Rozmístění komponent pro záznam (půdorys).....	41
7. Schéma hlavice stativu.....	41
8. Ukázka výsledků použití pluginu <i>Manual Tracking</i>	45
9. Demonstrace příkazu <i>Enhace Contrast</i>	46
10. Modelové obrázky tloušťky kanálu – částice M.....	47
11. Modelové obrázky tloušťky kanálu – částice S.....	48
12. Modelové obrázky tloušťky kanálu – částice V.....	48
13. Demonstrace funkce <i>Colour Deconvolution</i>	49
14. Demonstrace funkce <i>Colour Inspektor 3D</i>	49
15. Demonstrace funkce <i>Threshold Colour</i>	50
16. Demonstrace zpracování obrázků systému PR_V_4_MM.....	52
17. Demonstrace „paprskového způsobu“.....	54
18. Demonstrace příkazu <i>Watershed</i>	54

Seznam tabulek

1. Charakteristika částic.....	63
2. Charakteristika kapalin.....	63
3. Charakteristika barviva.....	63
4. Parametry mocninového modelu.....	63
5. Parametry Carreauova modelu.....	63
6. Pádová rychlost v newtonské kapalině.....	64
7. Pádová rychlost v nenewtonských kapalinách.....	64
8. Experimentální data pro systém EM_M.....	64
9. Experimentální data pro systém NA_M.....	65

10. Experimentální data pro systém PR_M.....	65
11. Experimentální data pro systém EM_S.....	67
12. Experimentální data pro systém NA_S.....	67
13. Experimentální data pro systém PR_S.....	68
14. Experimentální data pro systém EM_V.....	70
15. Experimentální data pro systém NA_V.....	70
16. Experimentální data pro systém PR_V.....	71
17. Experimentální data pro systém EM_M_MM.....	73
18. Porovnání naměřených a vypočtených rychlostí systému EM_M_MM...	73
19. Experimentální data pro systém EM_S_MM.....	73
20. Porovnání naměřených a vypočtených rychlostí systému EM_S_MM....	73
21. Experimentální data pro systém EM_V_MM.....	74
22. Porovnání naměřených a vypočtených rychlostí systému EM_V_MM....	74
23. Experimentální data pro systém NA_M_MM.....	74
24. Experimentální data pro systém NA_S_MM.....	75
25. Experimentální data pro systém NA_V_MM.....	75
26. Experimentální data pro systém PR_M_MM.....	75
27. Experimentální data pro systém PR_S_MM.....	75
28. Experimentální data pro systém PR_V_MM.....	75
29. Parametry zónového modelu pro systém NA_M_MM.....	76
30. Parametry zónového modelu pro systém NA_S_MM.....	78
31. Parametry zónového modelu pro systém NA_V_MM.....	80
32. Parametry zónového modelu pro systém PR_M_MM.....	82
33. Parametry zónového modelu pro systém PR_S_MM.....	84
34. Parametry zónového modelu pro systém PR_V_MM.....	86

1. Seznam symbolů

<i>symbol</i>	<i>význam</i>	<i>jednotka</i>
a	měrný povrch vrstvy (9)	$[\text{m}^{-1}]$
a	kratší strana obdélníku (39)	$[\text{m}]$
A	plocha průmětu expanzní vrstvy	$[\text{m}^2]$
A_{ch}	plocha průmětu kanálů	$[\text{m}^2]$
A'_{Ch}	plocha průmětu volného prostoru mezi částicemi	$[\text{m}^2]$
A_S	povrch částic ve vrstvě	$[\text{m}^2]$
Ar	Archimédovo kritérium	$[-]$
Ar_N	Archimédovo kritérium pro mocninovou kapalinu	$[-]$
b	delší strana obdélníku	$[\text{m}]$
c_D	součinitel odporu	$[-]$
d	charakteristický rozměr částice	$[\text{m}]$
Δd	pravděpodobná chyba průměru z kvadrátu odchylek	$[\text{m}]$
D	charakteristický rozměr kolony	$[\text{m}]$
D_E	ekvivalentní průměr obdélníkově kolony	$[\text{m}]$
f	podíl objemových průtoků (kanál/celek)	$[-]$
F_w	korekční faktor vlivu stěn	$[-]$
Fr	Froudeho kritérium	$[-]$
g	tíhové zrychlení	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-2}]$
h	výška fluidní vrstvy	$[\text{m}]$
\vec{I}	jednotkový tenzor	$[-]$
k	koeficient v Richardson – Zakiho rovnici	$[-]$
K	součinitel konzistence	$[-]$
l	délka měřeného úseku pádu částic	$[\text{m}]$
l_c	celková dráha uražená čelem obarvené kapaliny	$[\text{m}]$
L	teoretická dráha uražená ve svislé poloze	$[\text{m}]$
m	parametr Carreauova modelu	$[-]$
m_S	navážka částic	$[\text{kg}]$
Δm	přírůstek hmotnosti	$[\text{kg}]$
n	index toku	$[-]$
q	kroutivost	$[-]$
Δp	tlaková ztráta	$[\text{Pa}]$
Re	Reynoldsovo kritérium	$[-]$
Re_N	Reynoldsovo kritérium pro mocninovou kapalinu	$[-]$
Re_t	Reynoldsovo kritérium pro pád částic	$[-]$
$Re_{t,C}$	modifikované Re kritérium pro Carreauovu kapalinu	$[-]$
$Re_{t,C}^*$	kritická hodnota $Re_{t,C}$	$[-]$
$Re_{t,N}$	modifikované Re kritérium pro mocninovou kapalinu	$[-]$
S	celkový průřez kolony	$[\text{m}^2]$

S_{ch}	průřez kanálků	[m ²]
S_v	volný průřez vrstvy částic	[m ²]
t	tloušťka fluidační kolony	[m]
$t_{\Delta m}$	doba přírůstku hmotnosti Δm	[s]
\bar{t}	střední hodnota pádu částic na úseku l	[s]
u	mimovrstvová rychlost	[m.s ⁻¹]
u_1	rychlost kapaliny ve vrstvě částic (zónový model)	[m.s ⁻¹]
u_B	bezrozměrná rychlost	[-]
u_{ch}	charakteristická rychlost v kanálcích	[m.s ⁻¹]
u_i	charakteristická rychlost (43)	[m.s ⁻¹]
u_t	pádová rychlost částice	[m.s ⁻¹]
u_{mf}	práhová rychlost fluidace	[m.s ⁻¹]
$u_{t,\infty}$	pádová rychlost částice v neomezené kapalině	[m.s ⁻¹]
u_ε	mezerová rychlost	[m.s ⁻¹]
V	celkový objem	[m ³]
V_S	objem částic ve vrstvě	[m ³]
\dot{V}	objemový průtok kapaliny	[m ³ .s ⁻¹]
\dot{V}_{ch}	objemový průtok v kanálcích (zónový model)	[m ³ .s ⁻¹]
x	počet vrstev kuliček netvořící kanál	[-]
z	koeficient v Richardson – Zakiho rovnici	[-]

Řecká abeceda

$\dot{\gamma}$	velikost tenzoru rychlosti deformace	[s ⁻¹]
$\vec{\gamma}$	tenzor rychlosti deformace	[s ⁻¹]
δ	relativní odchylka	[-]
Δ	rozdíl rychlostí	[m.s ⁻¹]
ε	mezerovitost	[-]
ε_1	mezerovitost vrstvy (zónový model)	[-]
ε_i	charakteristická mezerovitost (43)	[-]
ε_{mf}	práhová mezerovitost fluidace	[-]
η	nenewtonská (zdánlivá) viskozita kapalin	[Pa.s]
η_0	dolní limitní viskozita	[Pa.s]
η_∞	horní limitní viskozita	[Pa.s]
λ	časový parametr	[s]
Λ_t	bezrozměrný časový parametr	[-]
μ	dynamická viskozita kapalin	[Pa.s]
ρ_L	hustota kapalin	[kg.m ³]
ρ_S	hustota částic	[kg.m ³]
σ	směrodatná odchylka	[-]

τ	velikost tenzoru vazkých napětí	[Pa]
$\vec{\tau}$	tenzor deformačních (vazkých) napětí	[Pa]
τ_0	mezní tečné napětí (viskoplastické kapaliny)	[Pa]
χ	převrácená hodnota stupně pokrytí šířky kolony	[-]

Seznam indexů

exp	experimentální
vyp	vypočtené

2. Úvod

Díky svým výhodám, mezi něž především patří intenzivní promíchávání (vyšší rychlost přestupu hmoty a tepla) a možnost kontinualizace procesů se zrnitými materiály, nalézá fluidní technika řadu uplatnění v biokatalytických a katalytických procesech, při adsorpci, sušení, krystalizaci, směšování, třídění, čištění odpadních vod apod. Např. literatura [1] uvádí použití fluidace v alkylačních procesech jak alifatických tak aromatických uhlovodíků, jejichž produkce v posledních letech narůstá.

Výhody a možnosti použití tohoto procesu vedly k dlouhodobému zájmu o jeho pokrok, který byl dosažen při studiu zákonitostí newtonských tekutin proudících fluidní vrstvou tuhých částic. Studium fluidace nenewtonských tekutin nebylo doposud věnováno takové pozornosti a přitom v literatuře [2], [3] je publikováno, že se s touto problematikou setkáváme především v procesech pracujících s polymery, potravinářství a biotechnologii, které je dnes věnováno mnoho pozornosti. Proto bylo do výzkumného programu KCHI Fakulty chemicko-technologické Univerzity Pardubice zařazeno mimo jiné i studium této problematiky.

Předchozí výzkumy na KCHI ukázaly, že při fluidaci vrstev částic viskoelastických roztoků přestává být vrstva částic stabilní a dochází ve vrstvě k nehomogenitám (tvoření kanálů, zvyšování axiální cirkulace částic), což vede ke snížení míry expanze vrstvy.

Tato diplomová práce se zabývá studiem fluidní vrstvy v závislosti na reologických vlastnostech kapalin, analýzou a popisem nehomogenit, pomocí vizualizace vrstvy metodou zbarvování vstupního proudu kapaliny.

3. Teoretická část

V teoretické části diplomové práce jsou stručnou formou shrnuty základní pojmy týkající se reologie, fluidace, zpracování a analýzy obrazu, které jsou nezbytné pro vyřešení zadaného problému. Dále je uveden stručný přehled vizualizačních metod proudění kapalin vrstvou částic.

3.1 Úvod do reologie

Vznik dynamického napětí v tekutinách je spojen s vnitřním třením způsobeným jejich deformací. Zatímco u pevných látek je v rovnovážném stavu napětí závislé na deformaci, závisí rovnovážné dynamické napětí u tekutin na rychlosti deformace. Studium závislosti mezi napětím a deformací se zabývá vědní obor *reologie*.

Působením vnějších sil na látku dochází k deformaci. Deformací nazýváme změnu vzájemné polohy materiálových částic látky. Při deformaci látky může docházet ke změně jejího objemu nebo tvaru. Objemová deformace nastává působením isotropního tlaku, tvarová deformace je výsledkem deformačních napětí.

Podle druhu přetvoření rozlišujeme: *deformaci elastickou*, *deformaci plastickou* a *viskózní tok*.

Deformace elastická je vratná, po skončení působení vnějších sil deformace zaniká a energie spotřebovaná k deformaci se v okamžiku návratu do původního tvaru uvolňuje.

Deformace plastická je nevratná, po oddálení působení vnějších sil deformace nezaniká a energie spotřebovaná na deformaci disipuje (mění se na tepelnou).

Viskózní tok je nevratná deformace, již stupeň po dobu působení narůstá a energie spotřebovaná na deformaci disipuje.

Matematickým vyjádřením tokových vlastností kapalin jsou reologické stavové rovnice, které vyjadřují vztah mezi tenzorem deformačních (vazkých) napětí $\vec{\tau}$ a kinematických tenzorech, ve zjednodušujících případech konkrétně na tenzoru rychlosti deformace $\vec{\dot{\gamma}}$.

3.1.1 Rozdělení tekutin

Podle tvaru reologické stavové rovnice rozlišujeme různé druhy tekutin: *dokonalá tekutina*, *newtonská tekutina*, *nenevtonská tekutina*.

3.1.1.1 Dokonalá tekutina

Nepůsobí-li na tekutinu žádné tečné napětí a má tedy nulovou viskozitu, označujeme tuto tekutinu jako dokonalou (modelový případ tekutiny). Její reologická stavová rovnice odpovídá:

$$\vec{\tau} = \vec{0}. \quad (1)$$

3.1.1.2 Newtonská tekutina

Newtonské tekutiny nazýváme takové, pro které obecně platí, že tenzor vazkých napětí je lineární funkcí tenzoru rychlosti deformace. Rovnice se nazývá *Newtonův zákon vazkého tření* pro tekutiny a v obecné formě ji lze vyjádřit rovnicí:

$$\vec{\tau} = -\frac{2}{3} \mu \vec{I} \operatorname{tr} \dot{\gamma} + \mu \dot{\gamma}. \quad (2)$$

Konstantu úměrnosti μ nazýváme dynamickou viskozitou, její hodnota je funkcí druhu kapaliny, teploty a tlaku, ale nezávisí na rychlosti deformace, \vec{I} je jednotkový tenzor, tr je matematický operátor – stopa tenzoru. Bližší informace lze nalézt např. v literatuře [4].

Předpokládáme-li, že je tekutina nestlačitelná, přejde rovnice do tvaru:

$$\vec{\tau} = \mu \dot{\gamma}. \quad (3)$$

3.1.1.3 Nenewtonská tekutina

V praxi se setkáváme s řadou tekutin, jejichž reologické chování nelze popsat Newtonovým zákonem – souhrnně je nazýváme nenewtonské. Podle způsobu, jakým se tekutiny při působení sil deformují, je lze rozdělit:

- a) čistě viskózní časově nezávislé
- b) čistě viskózní s časově závislou složkou rychlosti deformace
- c) viskoelastické

ad a) Čistě viskózní časově nezávislé

Příkladem čistě viskózních kapalin jsou zobecněné newtonské kapaliny (ZNK), pro které lze vztah mezi tečným napětím a rychlostí deformace vyjádřit analogicky se vztahem (3) jako:

$$\vec{\tau} = \eta \dot{\gamma}, \quad (4)$$

kde η je tzv. neneutonská (zdánlivá) viskozita kapalina. Zdánlivá viskozita není, na rozdíl od dynamické viskozity, látkovou konstantou, ale její hodnota se mění na druhém invariantu tenzoru rychlosti deformace nebo tenzoru vazkých napětí. K charakterizaci toku těchto kapalin nevystačíme jen s jednou hodnotou η , ale musíme znát průběh závislosti $\eta = \eta(\dot{\gamma})$ v širším intervalu $\dot{\gamma}$.

Rovnici (3) lze zapsat ve skalárním tvaru:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \dot{\gamma} . \quad (5)$$

kde τ je velikost tenzoru vazkých napětí a $\dot{\gamma}$ je velikost tenzoru rychlosti deformace. Klesá-li hodnota η s rostoucí hodnotou $\dot{\gamma}$, označujeme kapalinu jako *pseudoplastickou*. Roste-li η s rostoucí $\dot{\gamma}$, označujeme ji jako *dilatantní*. Dochází-li ke zvyšování rychlosti deformace až po překročení určitého mezního tečného napětí τ_0 , meze kluzu, mluvíme o *viskoplastických kapalinách*.

ad b) Čistě viskózní s časově závislou složkou rychlosti deformace

Kapaliny charakteristické tím, že se s dobou působení napětí mění zdánlivá viskozita. Dělíme je na *tixotropní* a *reopexní (antitixotropní)*. Tekutiny, u kterých v určitých mezích klesá zdánlivá viskozita s časem při náhlém působení konstantního tečného napětí, se označují jako tixotropní, zatímco tekutiny, u nichž naopak viskozita s časem roste, jsou reopexní.

ad c) Viskoelastické

Viskoelastické chování se projevuje nejen závislostí napětí na rychlosti deformace jako u čistě viskózních kapalin, ale také na deformaci samé jako u elastických pevných látek (chování kapaliny nezávisí na okamžité hodnotě rychlosti deformace, ale také na tzv. deformační historii).

3.1.2 Tokové modely tekutin

Tokové (viskozitní) modely jsou empirické nebo poloempirické rovnice, které matematicky popisují tzv. tokovou (viskozitní) křivku (jsou to rovnice popisující závislost tečného napětí, resp. viskozity, na rychlosti deformace). Pro praktické aplikace se vedle nezbytné informace v potřebném rozsahu veličin vyžaduje i jednoduchost modelu a možnost snadného stanovení jeho parametrů.

Pro ZNK bez meze kluzu se např. používají tyto modely: dvouparametrový model – *Ostwaldův – De Waelův model (mocninový)*, tříparametrové modely – *Ellisův, Grossův – Williamsonův*, čtyřparametrové modely – *Carreaův, De Keeův*, pětiparametrový model – *Carreaův – Yasudův*.

Mezi nejúživanější modely patří:

Ostwaldův – De Waelův (mocninový) model

$$\tau = K \dot{\gamma}^n \quad (6)$$

Jedná se o dvouparametrový model. Parametr modelu K se nazývá součinitel konzistence a n index toku. Předností tohoto modelu je jednoduchost a jednoduchá technická aplikace. Nevýhodou je, že není schopen popsat tokovou křivku v širokém rozsahu rychlosti deformace. Pro pseudoplastické kapaliny je $n < 1$, pro dilatantní $n > 1$ a pro newtonské kapaliny je $n = 1$ a K má pak význam dynamické viskozity.

Carreaův model

$$\tau = \left\{ \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{[1 + (\lambda \dot{\gamma})^2]^{\frac{1-m}{2}}} \right\} \dot{\gamma} \quad (7)$$

Čtyřparametrový model, kde η_0 je dolní limitní viskozita při $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, η_{∞} je horní limitní viskozita při $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$, λ je časový parametr a m parametr analogický indexu toku. Výhodou modelu je, že umožňuje popsat tokové křivky v širokém rozsahu rychlostí deformací. Carreaův model se pro $\eta \gg \eta_0$ používá jako tříparametrový model, kde se předpokládá $\eta_{\infty} = 0$.

Pro viskoplastické kapaliny se používají modely: *Binghamův*, *Herschel – Bulkleyův*.

Pro viskoelastické kapaliny se používají diferenciální a integrální reologické rovnice. Nejjednodušším modelem je *Maxwellův model lineární viskoelasticity* (objevuje se další parametr λ_0 , relaxační čas kapaliny). Přehled těchto modelů je uveden např. v literatuře [5], [6].

V posledních publikacích (např. [7]) se stávající modely modifikují, např. *Binghamův model* modifikován *Papanastasiou*, *Herschelův – Bulkleyův model* modifikován *Mitsoulisem a Abdalim*.

3.2 Fluidace

Fluidace je proces, při němž se vrstva práškovité tuhé látky v zařízení s děrovaným dnem uvádí do vzhledu přiváděním plynu do děrovaného dna. Proces, který se používá pro spalování práškových paliv, zpracování práškových rud, při sušení práškového materiálu a v reaktorech s katalyzátory (reaktor s fluidní vrstvou katalyzátoru).

3.2.1 Základní pojmy

Fluidní vrstva – vrstva vzájemně nefixovaných částic o hustotě ρ_s , kterou proudí tekutina o hustotě ρ_L (kde platí $\rho_s > \rho_L$) proti směru působení tíhy a udržuje částice ve vznosu. Při nízkých rychlostech proudění se s rostoucí rychlostí kapaliny objem vrstvy nemění. Odpor vrstvy roste až do dosažení mezní hodnoty rychlosti kapaliny, kdy dochází k rovnováze mezi silou odporu, kterou jsou částice nadlehčovány a jejich tíhou zmenšenou o vztlak. Další nárůst rychlosti vede k zvyšování objemu vrstvy – tzv. expanzi.

Stabilita fluidní vrstvy – veličiny určující přechod mezi rovnoměrnou a nerovnoměrnou fluidní vrstvou [8], [9].

Podle rozložení částic ve vrstvě dělíme fluidní vrstvy:

- a) *Rovnoměrná fluidní vrstva* – strukturně homogenní, koncentrace částic nebo mezerovitost jsou v celé vrstvě přibližně konstantní.
- b) *Nerovnoměrná fluidní vrstva* – se vyznačuje změnou koncentrace částic nebo mezerovitosti s místem ve vrstvě.

Mezní případy fluidní vrstvy:

Práh fluidace – určen dosažením mimovrstvové rychlosti tekutiny, kdy je síla odporu v rovnováze s tíhou částic zmenšenou o vztlak. Tomuto stavu odpovídají prahová rychlost u_{mf} a prahová mezerovitost ε_{mf} .

Práh úletu – expanze vrstvy může pokračovat až do stavu, kdy mezerovitost $\varepsilon \rightarrow 1$ a jednotlivé částice se přestanou navzájem ovlivňovat. Rychlost tekutiny, při které tato situace nastane, se označuje jako prahová rychlost úletu. Při překročení prahové rychlosti úletu jsou částice unášeny tekutinou ze zařízení a tuto rychlost můžeme pokládat za rovnou hodnotě pádové rychlosti jednotlivých částic.

Expanzní křivka – grafické vyjádření závislosti mimovrstvové rychlosti na mezerovitosti (charakteristika expanzní vrstvy).

Charakteristické veličiny – snaha zobecnit dosažené výsledky pro různé tvary částic si vyžádala zavedení různě definovaných lineárních rozměrů a tvarových charakteristik částic.

Jako charakteristický lineární rozměr se často volí různě definované ekvivalentní průměry. Např. mezi ně patří *ekvivalentní objemový průměr* částice, definovaný jako průměr koule téhož objemu jako má částice. Srovnání s koulí, která má stejný povrch jako srovnávaná částice, vede k definici *povrchového průměru částice*.

Statické tvarové charakteristiky částic se určují např. ze znalosti geometrie částic. Nejpoužívanější je tzv. *sféricita* částice, definovaná jako poměr povrchu koule k povrchu dané částice téhož objemu. Další možnou veličinou je tvarový faktor zvaný „*kruhovitost*“, který se definuje jako poměr obvodu kruhu ke skutečnému obvodu částice.

Mezerovitost vrstvy – udává poměr mezi objemem mezer a objemem celkovým:

$$\varepsilon = \frac{V - V_s}{V}, \quad (8)$$

kde V_s je objem částic ve vrstvě a V celkový objem vrstvy.

Měrný povrch vrstvy – poměr plochy částic a celkového objemu vrstvy:

$$a = \frac{A_s}{V} = \frac{A_s}{V_s}(1 - \varepsilon), \quad (9)$$

kde A_s je povrch částic ve vrstvě.

Mimovrstvová rychlost – objemový průtok tekutiny \dot{V} vztažený k průřezu zařízení S :

$$u = \frac{\dot{V}}{S}. \quad (10)$$

Mezerová rychlost – rychlost vztažená k volnému průřezu vrstvy S_v :

$$u_\varepsilon = \frac{\dot{V}}{S_v} = \frac{\dot{V}}{S\varepsilon} = \frac{u}{\varepsilon}. \quad (11)$$

3.2.2 Fluidace newtonských tekutin

Detailní chování fluidní vrstvy se velmi obtížně popisuje, proto se vychází ze zjednodušujících modelů, mezi něž patří *kapilární model vrstvy*, *buňkový model vrstvy* nebo se k popisu vrstvy vychází z *teorie podobnosti*. Hydrodynamické vlastnosti fluidní vrstvy jsou shrnuty v řadě publikací např. [10], [11], [12].

K popisu expazní vrstvy se nejčastěji užívají kritériální rovnice, které obsahují kritéria jako Reynoldsovo Re a Archimédovo Ar , popř. Ljaščenkovo Ly . Pro fluidaci kulových částic tvořící rovnoměrnou fluidní vrstvu můžeme psát závislosti:

$$f\left(\text{Re}_t, \frac{u}{u_t}, \varepsilon, \frac{d}{D}\right) = 0 \quad (12)$$

$$f\left(\text{Ar}, \text{Re}, \varepsilon, \frac{d}{D}\right) = 0 \quad (13)$$

$$f\left(\text{Ly}, \frac{u}{u_t}, \varepsilon, \frac{d}{D}\right) = 0, \quad (14)$$

kde d je charakteristický rozměr částice, D je charakteristický rozměr kolony a u_t je pádová rychlost částice. Pro jednotlivá kritéria platí:

$$\text{Ar} = \frac{g d^3 (\rho_s - \rho_L) \rho_L}{\mu^2} \quad (15)$$

$$\text{Ly} = \frac{u_t^3 \rho^2}{g \mu (\rho_s - \rho_L)} \quad (16)$$

$$\text{Re} = \frac{d u \rho_L}{\mu} \quad (17)$$

$$\text{Re}_t = \frac{d u_t \rho_L}{\mu}. \quad (18)$$

Další závislostí je např. velmi jednoduchá rovnice [13]:

$$\text{Re} = \frac{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6 \sqrt{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}}, \quad (19)$$

nebo lze užít kritériální rovnici ve tvaru:

$$\frac{u}{u_t} = k \varepsilon^z, \quad (20)$$

kde k je koeficient a z je funkcí Re a Ar . Podle Richardsona a Zakiho [14] vztah (20) lze napsat ve tvaru:

$$\frac{u}{u_t} = \varepsilon^z. \quad (21)$$

Koeficient z pro plouživou a přechodnou oblast se určí ze vztahů:

$$\text{pro } \text{Re}_t < 0,2 \quad z = 4,65 + 20 \frac{d}{D} \quad (22)$$

$$\text{pro } 0,2 < \text{Re}_t < 1 \quad z = \left(4,4 + 18 \frac{d}{D} \right) \text{Re}_t^{-0,03} \quad (23)$$

$$\text{pro } 1 < \text{Re}_t < 200 \quad z = \left(4,4 + 18 \frac{d}{D} \right) \text{Re}_t^{-0,1}. \quad (24)$$

$$\text{pro } 200 < \text{Re}_t \quad z = 2,4. \quad (25)$$

Další empirické a poloempirické vztahy pro popis fluidní vrstvy jsou uvedeny v mnoha publikacích např. pro expanzi rovnoměrné fluidní vrstvy částic [15], [16], [17], [18], [19], [20] a mnoho dalších.

Výše navržené vztahy pro expanzi je možné použít i pro určení prahové rychlosti fluidace u_{mf} , jestliže se do nich dosadí prahová mezerovitost ε_{mf} [10], [11], [21].

3.2.3 Fluidace nenewtonských tekutin

Pro popis fluidace nenewtonskými kapalinami se vychází ze stejných modelových představ jako pro newtonské kapaliny, jsou však doplněny o příslušné tokové modely, vyjadřující reologické chování kapalin. Viskozitní funkce kapalin jsou vyjadřovány nejčastěji mocninovým (6) nebo Carreauovým modelem (7).

Většina autorů pro popis proudění využívá dříve zmíněné modely pro popis fluidní vrstvy newtonských tekutin – kapilární a buňkový model vrstvy nebo se modifikují různé empirické vztahy (např. modifikace Richardson – Zakiho teorie fluidní vrstvy).

3.2.3.1 Rovnice expanze odvozené z kapilárního a buňkového modelu vrstvy

Kapilární model předpokládá ve vrstvě tvořící se kanálky různých průměrů a délek, kterými daná tekutina protéká.

Z této představy vyšli např. autoři v publikacích [22], [23], [24]. Autoři považují struktury expandované a nehybné vrstvy za shodné a aplikují na fluidní vrstvu Blakeho – Kozenyho kapilární model. Tento model předpokládá, že se v nehybné vrstvě částic v prostoru mezi částicemi vytvářejí nepravidelné kanálky, kterými proudí tekutina.

Buňkový model toku kapaliny definuje vrstvu obtékaných částic jako soustavu buněk, složených ze dvou soustředných koulí. Nejužívanějším je Happelův buňkový model „neomezeného povrchu“.

Pro fluidaci částic mocninovou kapalinou lze na základě kapilárního a buňkového modelu vyjádřit expanzi vrstvy vztahem:

$$\text{Ar}_N = f_1(n, \varepsilon) \text{Re}_N^{\frac{n}{2-n}} + f_2(n, \varepsilon) \text{Re}_N^{\frac{2}{2-n}}, \quad (26)$$

kde Ar_N je Archimédovo kritérium a Re_N je Reynoldsovo kritérium, pro mocninovou kapalinu definovány jako:

$$\text{Ar}_N = \frac{3}{4} c_D \text{Re}_N^{\frac{2}{2-n}} = \frac{g d^{\frac{2+n}{2-n}} (\rho_S - \rho_L) \rho_L^{\frac{n}{2-n}}}{K^{\frac{2}{2-n}}} \quad (27)$$

$$\text{Re}_N = \frac{\rho_L u^{2-n} d^n}{K}, \quad (28)$$

kde c_D je součinitel odporu.

$f_1(n, \varepsilon)$ a $f_2(n, \varepsilon)$ jsou funkce závislé na indexu toku a mezerovitosti, jejich vyjádření lze nalézt např. v literatuře [23], [26], [27] a další.

3.2.3.2 Rovnice expanze odvozené modifikací Richardson – Zakiho teorie fluidní vrstvy

Teorie založená na obtékání osamocené částice.

Za předpokladu rovnoměrného rozložení kulových částic ve fluidní vrstvě, lze na základě dynamické rovnováhy sil ve fluidní vrstvě vyjádřit expanzi vrstvy obdobně jako u kapilárního a buňkového modelu rovnicí (26) s hodnotou $f_1 = 18Y(n, \varepsilon)$, kde $Y(n, \varepsilon)$ je funkce mezerovitosti prezentovaná ve formě grafu [27].

V publikované práci [28] navrhli autoři pro newtonskou a mocninovou kapalinu vztah pro výpočet mezerovitosti vrstvy:

$$\varepsilon = \left[\left(\frac{18K u^n}{d^{1+n}} + 3\sqrt{\frac{K \rho_L u^{2+n}}{d^{2+n}} + \frac{0,3 \rho_L u^2}{d}} \right) \frac{1}{g(\rho_S - \rho_L)} \right]^{\frac{1}{3,8n+1}}. \quad (29)$$

Vztah byl ověřen pro newtonskou kapalinu v rozmezí $8,14 < \text{Re}_t < 3947$ a pro mocninovou kapalinu $87 < \text{Re}_{t,N} < 420$ a $0,561 < n < 0,84$, kde $\text{Re}_{t,N}$ je modifikované Reynoldsovo číslo pro mocninovou kapalinu:

$$\text{Re}_{t,N} = \frac{\rho_L u_t^{2-n} d^n}{K}, \quad (30)$$

kde u_t je pádová rychlost částice.

3.2.3.3 Rovnice expanse odvozené z teorie podobnosti

Jiný způsob popisu chování fluidní vrstvy vychází ze znalosti pádové rychlosti částice. Analýzou pohybových rovnic pro obtékání kulových částic mocninovou kapalinou lze získat kritériální vztah:

$$f\left(\text{Re}_{t,N}, \frac{u}{u_t}, \varepsilon, n, \frac{d}{D}\right) = 0. \quad (31)$$

Při fluidaci viskoelastickými roztoky polymerů bylo zjištěno, že s rostoucím průtokem kapaliny, v závislosti na stupni pseudoplasticity a elasticity kapaliny, rovnoměrná fluidace přestává být stabilní, vrstva postupně přechází na nerovnoměrnou, tvoří se nehomogenity v rozložení částic, dochází ke kanálkování vrstvy a ke zvýšení cirkulace částic. To má za následek snižování míry expanse vrstvy.

Pro předpověď mezerovitosti fluidní vrstvy pseudoplastických polymerních roztoků byla v plouživé oblasti navržena rovnice [29], [30]:

$$\varepsilon = \left(\frac{u}{u_t}\right)^{0,218-0,404 \frac{d}{D}} - 0,862(1-n) \left(\frac{u}{u_t}\right)^{0,802-1,36 \frac{d}{D}}, \quad (32)$$

který platí pro $Re_{t,N} < 0,5$ a $0,34 < n < 1$.

Práce [31] zkoumala pseudoplastické suspenze a z experimentálních dat navrhla rovnici expanze ve tvaru:

$$\frac{u}{u_{mf}} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{mf}} \right)^{13,27 - 6,97n - 15,67 \frac{d}{D}} \quad (33)$$

platná pro oblast podmínek $7 \cdot 10^{-4} < Re_{t,N} < 0,2$; $0,25 < n < 0,88$ a $0,05 < \frac{d}{D} < 0,24$.

Pro viskoelastické kapaliny popsány Carreauovým modelem (7) lze psát, pro popis expanzní vrstvy, kritériální rovnici ve tvaru:

$$f \left(Re_{t,C}, \frac{u}{u_t}, \varepsilon, m, \frac{d}{D}, \Lambda_t \right) = 0, \quad (34)$$

kde Λ_t je bezrozměrný časový parametr definován jako:

$$\Lambda_t = \frac{2 \lambda u_t}{d} \quad (35)$$

a $Re_{t,C}$ je Reynoldsovo kritérium pro pád částic v Carreauově kapalině:

$$Re_{t,C} = \frac{du_t \rho_L}{\eta_0} \left(1 + \Lambda_t^2 \right)^{\frac{1-m}{2}}. \quad (36)$$

Pro oblast $Re_{t,C} < 0,3$; $0 < \Lambda_t < 87$ a $0,18 < \frac{d}{D} < 0,139$ bylo autory publikací [29], [30] navržen empirický vztah:

$$\varepsilon = \left(\frac{u}{u_t} \right)^{0,218 - 0,404 \frac{d}{D}} - 0,224 \left(1 + 4,75 \frac{d}{D} \right) \left(\frac{\Lambda_t}{2} \right)^{0,5m} \left(\frac{u}{u_t} \right)^{1,55m}. \quad (37)$$

Pro fluidaci v obdélníkových kolonách bylo v práci [32] optimalizací experimentálních dat zjištěno, že vztah (32) je možno použít při substituci:

$$\frac{d}{D} = 0,417 \frac{d}{D_E}, \quad (38)$$

kde D_E je ekvivalentní průměr obdélníkové kolony, definován jako [33]:

$$D_E = \frac{2ab}{a+b} - \frac{2bd}{b+d}, \quad (39)$$

kde a je kratší strana obdélníku, b je delší strana a d je průměr částice.

Je-li $Re_{t,C} > 0,3$, nacházíme se v přechodné oblasti, kde bylo v publikaci [34] zjištěno, že s rostoucí hodnotou $Re_{t,C}$ slábne účinek elasticity a průběh expanze se blíží newtonské fluidaci. Při překročení kritické hodnoty Reynoldsova kriteriia $Re_{t,C}^* = 2\Lambda_t^{0,5}$ lze fluidaci předpovědět podle rovnice (21), kde parametr z lze vyjádřit:

$$z = \left(4,7 + 8,8 \frac{d}{D} \right) Re_{t,C}^{-0,1}. \quad (40)$$

$$z = \left(4,7 + 6 \frac{d}{D} \right) Re_{t,C}^{-0,1}. \quad (41)$$

$$z = \left(4,7 + 3 \frac{d}{D_E} \right) Re_{t,C}^{-0,1}. \quad (42)$$

Z průběhu expanzních křivek viskoelastických kapalin je patrné, že v logaritmickém měřítku lze expanzi rozdělit na dva lineární úseky [35], což lze popsat vztahy:

$$\frac{u}{u_i} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_i} \right)^{z_i}, \quad (43)$$

kde ε_i, u_i jsou charakteristické body expanzní křivky, z_i jsou exponenty odpovídající směrnici jednotlivých úseků.

Popisem fluidace nekulových částic se zabývaly práce [37], [38]. Bylo zjištěno, že chování expanzní vrstvy je obdobné jako chování kulových částic. Požívají se stejné vztahy, kde se za průměr částice dosazuje efektivní průměr.

3.2.3.4 Práhová rychlost fluidace

Práh fluidace je dán dosažením mimovrstvové rychlosti tekutiny, kdy je síla odporu v rovnováze s tíhou částic zmenšenou o vztlak. Její stav je charakterizován prahovou mezerovitostí a rychlostí.

Pro určení prahové rychlosti lze užít stejný vztah, jako je rovnice (26), do které se dosadí za mezerovitost prahová mezerovitost.

Jinou možností určení prahové rychlosti je užití teorie podobnosti. Publikace [34] doporučuje pro stanovení prahové rychlosti v oblasti $0,35 < n < 1$ a $0,41 < \varepsilon_{mf} < 0,49$ vztahy:

$$Re_{t,N} < 0,3 \quad \frac{u_{mf}}{u_t} = 0,018, \quad (44)$$

$$0,3 < Re_{t,N} < 165 \quad \frac{u_{mf}}{u_t} = 0,024 Re_{t,N}^{0,2}. \quad (45)$$

Pro kolony nekruhového průřezu navrhli autoři v literatuře [39] pro plouživou oblast $Re_{t,N} < 0,3$ rovnici:

$$\frac{u_{mf}}{u_t} = 0,018 \left(1 + 0,33 \frac{d}{D_E} \right). \quad (46)$$

Pro nekulové částice opět platí, že se jejich průměr nahradí ekvivalentním průměrem.

3.2.4 Homogenita a hodnocení fluidní vrstvy

Podle rozložení částic ve fluidní vrstvě rozdělujeme fluidaci na *rovnoměrnou* a *nerovnoměrnou*.

Fluidace v systémech newtonská kapalina – tuhá částice jsou obvykle rovnoměrná. Fluidní vrstva je však nestejnorodý systém s komplikovanou vnitřní strukturou podléhající náhodným změnám.

Popisem přechodu mezi rovnoměrnou a nerovnoměrnou vrstvou se zabývá hydrodynamická teorie stability fluidní vrstvy [8], [11].

Nerovnoměrná fluidní vrstva se vyznačuje nepravidelností v rozložení částic ve vrstvě. Charakteristické pro nerovnoměrnost je vznik fluidní vrstvy kanálkující, bublající, pístující nebo gejzírující. Nerovnoměrnosti mohou vznikat přímo ve vrstvě vlivem rozdělovače tekutiny [40]. Ve vrstvě přiléhající k rozdělovači se vytvoří pulsace, které buď ve fluidní vrstvě zanikají, nebo narůstají a vytvářejí nerovnoměrnosti. Nerovnoměrné chování vrstvy fluidované elastickou kapalinou lze též vysvětlit, předpokládáme-li částečné uspořádání struktury tekutiny ve směru toku. Potom lze očekávat i mnohem menší schopnost autostabilizace takovýchto vrstev, neboť částice, které by se pohybovaly radiálně do míst nerovnoměrnosti, by v důsledku nerovnoměrného uspořádání tekutiny ve směru toku měly vyšší odpor, než odpovídá neneutonské viskozitě. Částice jsou zřejmě vlivem normálových napětí formovány do kanálu ve vrstvě.

Nerovnoměrnosti ve fluidní vrstvě se zkoumají sledováním lokálních změn mezerovitosti. Změny se indikují čidly instalovanými do fluidní vrstvy, jsou to např. kapacitní zóny, magnetické cely, piezoelektrická čidla [8], [41]. Nevýhodou této metody je místní narušení fluidního pole. Další metodou vizualizace nehomogenity je metoda optická [40]. Jejich nevýhodou je silný vliv stěn na chování vrstvy a také nemožnost výzkumu neprůhledných vrstev. Namísto lokálních mezerovitostí se zde zkoumá přímo struktura celé fluidní vrstvy.

Fluidní vrstva se hodnotí jako celek, kdy se vynáší závislosti: bezrozměrné rychlosti u_b na mezerovitosti ε (expanzní křivka) [35], tlakové ztráty Δp na rychlosti kapaliny u [36], rychlosti u na Reynoldsově kritériu Re nebo mezerovitost ε na Froudeho kritériu Fr [52]. Hodnocení struktury vrstvy lze pomocí optických metod (zda jsou ve vrstvě nehomogenity, vznikají kanály apod.) nebo hodnotit např. vzájemnou vzdálenost mezi fluidujícími částicemi.

Vznik nerovnoměrností ve fluidní vrstvě částic fluidovaných silně elastickými kapalinami pozoroval ve své práci např. Mikulášek [42].

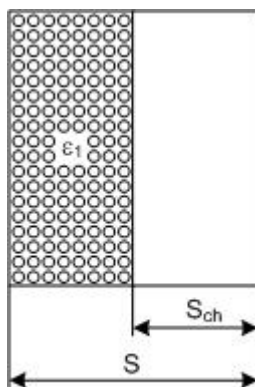
Při vyšším průtoku kapaliny dochází postupně ke kanálování vrstvy, vytváří se centrální kanál a roste axiální cirkulace částic ve vrstvě. Vznik kanálů ve vrstvě částic při fluidaci viskoelastickými kapalinami je publikován v [34], [35], diplomových pracích [32], [44], [45], [46], [47], [48] nebo disertační práci [49].

Z měření fluidace ve válcových kolonách a úzkých kolonách obdélníkového průřezu („dvourozměrné“ kolony) [35] lze z podobnosti expanzních křivek usoudit na podobnou strukturu vrstev v obou kolonách.

3.2.4.1 Zónový model expanze fluidní vrstvy

Model je založen na vzniku kanálků ve fluidní vrstvě [48], [50].

Fluidní vrstva se pomyslně rozdělí na dvě zóny, jak ukazuje obr. 1. V první zóně jsou částice rovnoměrně rozptýleny s mezerovitostí ε_1 a druhá zóna je tvořena rovnoběžnými kanálky bez částic.



Obr. 1. Zónový model

Celková mezerovitost je potom:

$$\varepsilon = \frac{\dot{V}_{ch} + (\dot{V} - \dot{V}_{ch})\varepsilon_1}{\dot{V}} = \frac{S_{ch}}{S} + \left(1 - \frac{S_{ch}}{S}\right)\varepsilon_1 = f \frac{u}{u_{ch}} + \left(1 - f \frac{u}{u_{ch}}\right)\varepsilon_1 \quad (47)$$

kde S_{ch} je průřez kanálku, u_{ch} je rychlost kapaliny v kanálcích a f je podíl objemového průtoku kapaliny v kanálcích a celkového objemového průtoku:

$$f = \frac{\dot{V}_{ch}}{\dot{V}} = \frac{S_{ch} u_{ch}}{S u} \quad (48)$$

Mimovrstvovou rychlost v zóně s homogenně rozloženými částicemi u_1 je možné vyjádřit jako:

$$u_1 = \frac{\dot{V} - \dot{V}_{ch}}{S - S_{ch}} = \frac{\dot{V}(1-f)}{S \left(1 - f \frac{u}{u_{ch}}\right)} = u \frac{1-f}{1 - f \frac{u}{u_{ch}}} \quad (49)$$

Budeme-li předpokládat, že mezerovitost zóny s částicemi ε_1 je vyjádřena pomocí rovnice Richardson – Zakiho typu, dostane rovnice tvar:

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{u_1}{F_w u_{t,\infty}} \right)^{\frac{1}{z}}. \quad (50)$$

Dosadíme-li rovnice (50) a (49) do rovnice (47), získáme po úpravě pro podíl objemových průtoků f tvar:

$$f = 1 - \frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_1} \frac{u_{t,\infty}}{u} \varepsilon_1^2 F_w. \quad (51)$$

3.3 Vizualizace proudění kapalin vrstvami částic

Vizualizace proudění nám umožňuje pohled do rozložení a struktury rychlostního pole, které je jinak pro lidské oko nepozorovatelné. Pro zviditelnění proudění existuje mnoho metod [51], ale jen některé jsou použitelné pro vizualizaci toku vrstvou částic. Níže jsou uvedeny jen vizualizační metody použitelné pro fluidaci a blíže popsána je *vizualizace pomocí barviv*.

Vizualizační metody lze obecně rozdělit na metody *optické* a *fyzikální*.

3.3.1 Optické metody

Optické metody jsou založeny na sledování pohybu barviv nebo různých částic přidávaných do kapaliny. Tento pohyb lze zachytit pomocí optického aparátu na záznam, který lze dále zpracovat. Nevýhodou optických metod je použití pouze v průhledných kapalinách, možné ovlivnění proudění v důsledku změn reologických vlastností roztoku a nutnost dalšího zpracování získaných záznamů. K výhodám patří technická nenáročnost a finanční dostupnost.

Mezi metody optické vizualizace kapalin proudící vrstvou částic patří: *vizualizace pomocí barviv*, *vizualizace pomocí elektrolýzy* a *metoda PIV (Particle Image Velocimetry)*.

Vizualizace pomocí barviv

Metoda založená na zviditelnění toku kapaliny pomocí barviva, které nemění nebo jen částečně mění její reologické vlastnosti.

Vizualizace pomocí elektrolýzy

Vizualizace založená na zviditelnění toku pomocí malých bublinek vodíku vytvořených pomocí elektrolýzy vody.

Metoda PIV

Metoda PIV (Particle Image Velocimetry) je založena na sledování velmi malých částic přidávaných do kapaliny. Většinou se používají částice na polystyrenové bázi potažené fluorescenční, fosforescenční nebo stříbrnou vrstvou.

3.3.1.1 Vizualizace pomocí barviv

Principem metody je pozorování pohybu kapaliny obarvené barvivem, které nemění nebo jen minimálně mění vlastnosti systému (u kapalin jsou to především její reologické vlastnosti).

Jedná se o jednu z nejstarších a nejjednodušších metod vizualizace.

K barvení se většinou využívají modrá, zelená nebo červená barviva, protože to jsou kontrastní odstíny, které mají při zpracování záznamu pomocí RGB (Red – červená, Green – zelená, Blue – modrá) kódování barev mají vysoké hodnoty svého barevného kanálu. Používaná barviva lze rozdělit na *běžná* a *speciální*.

Běžná barviva

Jsou to potravinářská barviva (výhodou je jejich nejedovatost, dobrá rozpustnost a dostupnost). Dále je možné použít analytické indikátory (např. Kongo červen, fenolová červen, bromkresolová zeleň, methylenová modř), barviva na textil (např. indigo), anilinové barvy, tuš, inkoust, mléko (proti černému pozadí) nebo roztok jódu se škrobovým mazem apod.

Fluorescentní barviva

Barviva, která při normálním osvětlení vypadají téměř průhledná, ale po osvětlení laserovým světlem odpovídající vlnové délky se projeví jejich fluorescence.

Fluorescence je schopnost látky absorbovat světlo o určité frekvenci a následně vyzářit světlo o nižší frekvenci. Tuto vlastnost lze výhodně využít při vizualizaci toku tekutin, protože vyzářené fluorescenční světlo má odlišnou vlnovou délku od excitačního, lze ho snadno odfiltrovat.

Mezi používaná barviva této skupiny patří fluorescein, rhodamin-B, rhodamin-6G [51].

Fotochromatická barviva

Fotochromatismus je schopnost reverzibilní změny mezi dvěma stavy o různých absorpčních spektrech. Fotochromatická barviva používaná

pro vizualizaci proudění jsou při osvětlení zdrojem světla vlnové délky v rozsahu viditelného spektra (VIS) bezbarvá (propouští viditelné spektrum). Při expozici světlem z ultrafialové oblasti spektra (UV) dojde ke strukturnímu přesmyku v molekule fotochromatického barviva, molekula začne absorbovat určité pásy z VIS, a přejde tak do svého barevného stavu. Poločas zpětné reakce na stabilní bezbarvou formu je v řádu jednotek až desítek sekund.

Výhodou této metody je možnost opakovaného vytvoření obarvení kdekoliv v kapalině a absence dávkovacího zařízení.

Bližší informace lze získat např. v publikacích [51], [54], [55].

3.3.2 Fyzikální metody

Fyzikální metody využívají měření změny fyzikálních veličin souvisejících s rychlostí nebo sledování přidaných částic v neviditelné oblasti spektra. Nevýhodou je dražší a komplikovanější měřicí sestava. Mezi výhody fyzikálních metod patří žádné nebo menší ovlivnění reologických vlastností proudící kapaliny oproti optickým metodám.

Mezi metody fyzikální vizualizace kapalin proudící vrstvou kapalin patří: *Dopplerův posun laserového paprsku a nukleární magnetická rezonance (NMR), rentgenová tomografie.*

Dopplerův posun laserového paprsku

Dopplerův posun je znám především u zvuku, ale nastává i u světla. Když se světlo odráží od pohybujícího se předmětu nebo ho předmět vyzařuje, kmitočet světla je posunutý úměrně rychlosti předmětu. Pro vizualizaci rychlosti kapaliny se do ní přidají malé částice o průměru 0,1 – 10 μm a přibližně shodné hustoty s kapalinou (neutrálně vznášivé). Částice jsou poté ozářeny laserovým světlem o známé frekvenci a z posunu frekvence se určí rychlost.

Nukleární magnetická rezonance

NMR je metoda, která měří precesní pohyb jaderných spinů v silném magnetickém poli (určují se energie přeskoků), používaná většinou pro zjištění struktury molekul.

Metodu lze využít i pro vizualizaci proudění. Pro sledování vyzářených vln jako funkce prostorové pozice a rychlosti musí být magnetické pole lineárně gradientně pulzující. Rychlost pohybu se určí ze systému diferenciálních rovnic (Blochovy rovnice).

Rentgenová tomografie

Použití rentgenových paprsků k prosvícení vrstvy částic, pozorování prosvícené části na stínítku (*skiaskopie*) nebo její fotografický záznam (*skiagrafie*). Je založena na různé prostupnosti jednotlivých částí pro rentgenové paprsky. Pro zvýšení citlivosti se do vrstvy přidávají kontrastní prostředky.

Zvláštní disciplínou je počítačová tomografie, která vytváří prostorový obraz objektu za pomoci souboru rovinných řezů. Každý řez se matematicky rekonstruuje z údajů o změnách záření procházejícího nebo vydávaného objektem v různých směrech.

Pro měření, aparatura obsahuje zdroj rentgenových paprsků a sadu analyzátorů, které v propojení s osobním počítačem vyhodnocují lokální rychlost v koloně [52], [53].

Bližší informace o jednotlivých metodách vizualizace proudění vrstvou částic jak fyzikálních tak optických metod podává diplomová práce [56] a publikace [51].

3.4 Analýza obrazu

Analýzu obrazu je možné obecně definovat jako nástroj, kterým popisujeme strukturu materiálu (tvar, množství a rozložení jednotlivých složek), abychom byli schopni nalézt vzájemné vztahy jejího uspořádání s vlastnostmi zkoumané struktury. Digitální analýza obrazu poskytuje oproti ručnímu hodnocení několik výhod: je nejméně o řád rychlejší, je snadno opakovatelná a obvykle nevyžaduje větší zkušenost s analytickým postupem. V některých případech je vhodné obraz (vstupní signál) převést transformací na odlišný (frekvenční, spektrální) tvar, což je pro další zpracování výhodnější. Reálný obraz je Fourierovou transformací (FT) převeden do frekvenčního spektra. Výsledný obraz je podobný difrakčnímu spektru s vlastnostmi odpovídajícími reciprokému prostoru (tj. zvýrazňující detaily a periodické prvky).

Tato moderní analytická metoda, která v posledních letech prošla značným vývojem a je nyní nepostradatelnou metodou v mnoha odvětvích od vesmírného výzkumu přes aplikace v medicíně, chemickém průmyslu, kriminalistice aj. Příklady použití jsou např. kvalitativní a kvantitativní analýza DNA, počítání mikrobiologických kolonií, analýza rakovinných buněk, analýza otisku prstu atd.

Cílem analýzy obrazu je za pomoci kamery a počítače „okopírovat“ biologický proces probíhající při přenosu a jeho interpretaci. Lidský mozek má mnoho zkušeností a může rozpoznat určité věci mnohem snadněji než počítač (např. pohyb). Na druhou stranu počítač může zpracovávat velké množství informací bez subjektivního vlivu.

Analýzu obrazu probíhá v posloupnosti těchto kroků:

1. *Snímání obrazu*
2. *Předzpracování obrazu*
3. *Segmentace na objekty*
4. *Analýza objektu*

3.4.1 Snímání obrazu

Snímání obrazu je prvním krokem při jeho analýze. Pro vlastní proces snímání obrazu musíme nejdříve nadefinovat podmínky pro dané měření. Tyto podmínky by pak měly zůstat zachovány po celou dobu měření, aby bylo dosaženo opakovatelných výsledků. Při změně podmínek snímání je nutné provést novou kalibraci systému. Mezi základní podmínky pro reprodukovatelnost měření patří výběr vhodné geometrie a osvětlení scény (zde patří umístění kamery, počet a rozmístění světel, intenzita světla, teplota bílého světla, absence okolního světla aj.).

Další operaci před samotným snímáním je výběr vhodné optické soustavy (objektiv, mezikroužky), kamery. Následuje vhodné nastavení kamery (clona, zaostření) a poté délková kalibrace podle etalonu (milimetrový papír, pravítko). Po provedení nezbytných operací může začít samotné snímání.

Obraz je při snímání digitální videokamerou transformován z optického signálu pomocí CCD čipu na digitální signál obsahující matici o počtu řádku a sloupců definovanou rozlišením CCD čipu. Každý bod této matice obsahuje informace o své poloze a o hodnotě svých barevných složek, čímž vznikne jeden snímek. Tyto body jsou nazývány pixely (z ang. picture – element). Videosekvence vznikne pořizováním alespoň 25 snímků za sekundu, protože tuto frekvenci snímku vnímá lidské oko jako plynulý pohyb.

Při snímání klasickou (analogovou) kamerou je nutné záznam digitalizovat přes TV kartu počítačem, při digitálním záznamu je snímek ukládán automaticky v digitální formě většinou na přenositelné médium.

3.4.1.1 Využití DV kamery

V dnešní době jsou DV (z ang. Digital Video) kamery cenově dostupné, stejně tak i výkonné počítače schopné úprav videa. Kamery jsou dodávány jako kompletní balíček obsahující kromě kamery také hardware k propojení s počítačem a jednoduchý software na digitalizaci (je-li to nutné) a střih videa.

Digitální videokamery (Digital8, Mini-DV, DV) jsou v dnešní době špičková zařízení, která ukládají video v digitální podobě. Záznam je ukládán v komprimované podobě z důvodu vysokého datového toku. Jeden nekomprimovaný snímek má datovou velikost asi 1MB. Při snímkové rychlosti 25 snímků za sekundu vychází tedy potřebná velikost datového prostoru pro každou sekundu asi na 25 MB pro nekomprimované video. Pro prohlížení a práci s nekomprimovaným videem potřebujeme extrémně rychlé diskové pole schopné takové velké množství dat v počítači uložit a obsloužit.

Cílem komprese je zmenšení datového toku při zachování vysoké kvality obrazu. Lidské oko je více citlivé na změny jasu obrazu než na změny barvy. Proto téměř všechny metody komprese videa používají tuto vlastnost lidského vnímání. Tyto techniky pracují tak, že odstraní velkou část barevné informace z obrazu. Pokud je každý snímek komprimován samostatně mluvíme o *intra-frame kompresi*.

Ke kompresi obrazu u většiny DV kamery se používá hardwarová intra-frame komprese DV25, která přenáší video konstantní rychlostí 25 MB

za sekundu a komprimuje ho s kompresním poměrem 5:1 do rozlišení 720 x 576 pixelů. V přenosu je obsažen také zvuk a řídicí signály, takže ukládány datový tok je nakonec přibližně 3,6 MB za sekundu. Barvy jsou ve formátu YUV 4:2:0 (Y = luminaci – jas, U a V – dvě barevné složky určující odstín bodu).

Jako rozhraní pro komunikaci osobních počítačů s DV kamerami slouží FireWire. Rozhraní je navrženo pro vysoké datové toky a dosahuje rychlosti až 400Mbit/s. Přehrání záznamu z videokamery do počítače či jiného zařízení pracující s digitálním videem se pak děje 1:1. Bližší informace lze nalézt v [57].

3.4.2 Předzpracování obrazu

Cílem předzpracování obrazu je vylepšení obrazových dat, potlačení nechtěného zkreslení nebo zvětšení určitých obrazových rysů důležitých pro další zpracování. Mezi používané metody patří [59]:

1. *Bodové jasové transformace* – které lze dále rozdělit na:

a) *Modifikace jasové stupnice* – je změnou jasu a kontrastu bodu obrazu bez ohledu na jeho umístění. Transformační vztah se hledá např. metodou ekvalizace histogramu jasu, která zvýší kontrast v okolí maxim histogramu a sníží kontrast v okolí jeho minim.

Histogram jasu je vektor, který má shodný počet složek s počtem jasových úrovní a hodnota každé složky odpovídá četnosti výskytu příslušného jasu v obraze, zobrazuje se jako sloupcový graf.

b) *Jasové korekce* – jsou změnou jasu bodu obrazu s ohledem na jeho polohu v obraze. Slouží k potlačení nehomogenit v obraze způsobených nedokonalým osvětlením, nečistotami na objektivu kamery a na snímaném objektu.

2. *Geometrické transformace* – při snímání zakřivených povrchů objektů je získán obraz s geometrickým zkreslením (např. družicové snímky). Geometrická transformace je vektorová funkce, která transformuje bod o souřadnicích $[x, y]$ do bodu $[x_0, y_0]$ a získá jeho úroveň jasu interpolací z okolních bodů vstupního obrazu.

3. *Filtrování* – k výpočtu jasu bodu ve výstupním obraze vychází pouze z lokálního okolí bodu ve vstupním obraze. Existují dva základní typy filtru:

a) *Vyhlazovací* – vedou k potlačování šumu a drobných fluktuací v obraze, ale zároveň rozmazávají všechny ostré čáry a přechody (hrany), výsledkem má být odstranění náhodného šumu. Používají se filtry založené na výpočtu aritmetického průměru, váženého průměru, mediánu aj. jasů bodů okolí.

b) *Gradientní* – jsou opakem vyhlazovacích filtrů, zvýrazňují všechny ostré hrany a ostří obraz, ale zároveň zesilují šum. Využívá se přitom různých gradientních operátorů (např. Laplaceův, Robertsův, atd.).

3.4.3 Segmentace obrazu na objekty

Segmentace obrazu na objekty je proces, který z obrazu vyčlení určité objekty našeho zájmu, které jsou určeny k dalšímu zpracování. Mezi používané metody segmentace patří *segmentace prahováním*, detekce hran (využívá gradientní operátory), narůstání oblastí (rozčlení obraz do homogenních oblastí a spojí oblasti, které vyhovují zadanému kritériu) a srovnávání se vzorem [59].

Segmentace prahováním je nejjednodušší a nejpoužívanější metodou. Obsahuje-li obraz kontrastní objekty vzhledem k pozadí, lze nastavit určitou jasovou úroveň (práh) k jejich oddělení. Práh může být globální i lokální. Hodnota prahu může být i více než jedna a lze prahovat i jednotlivé kanály barevných obrázků. Hodnota prahu se běžně určuje do minima histogramu nebo analýzou histogramu vhodným algoritmem se určí optimální hodnota (např. procentní prahování, analýza histogramu apod.). Má-li prahování kvalitně oddělit objekty od pozadí, je nutné, aby kontrast objektu byl dostatečný a aby distribuce odstínu objektu i pozadí byla minimální. V opačné situaci je možné dosáhnout pouze částečného oddělení.

3.4.4 Analýza objektů

Když jsou objekty našeho zájmu vyčleněny, lze přistoupit k jejich analýze. Lze tak získat jejich počet, rozměry, povrch, rychlost a dráhu jejich pohybu, apod.

K analýze objektu, ale i segmentaci jakož i předzpracování se využívají speciální programy. Některé z nich jsou dostupné jako freewareové produkty jako ImageJ – <http://rsb.info.nih.gov/> nebo komerční produkty jako LUCIA – <http://www.lucia.cz/>, ENVI – <http://www.rsinc.com/> a mnoho dalších.

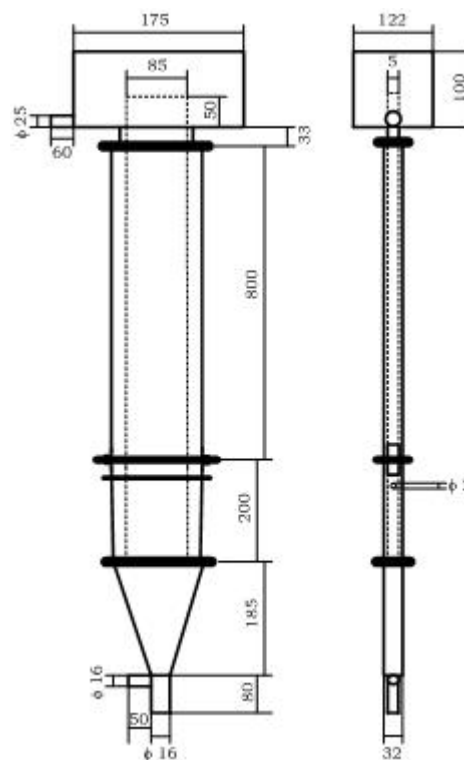
4. Experimentální část

Experimentální část diplomové práce obsahuje měření fluidace částic v obdélníkové koloně, zpracování záznamů expanze fluidních vrstev pomocí videokamery a vizualizace proudění kapaliny fluidní vrstvou – metodou obarvování. Součástí bylo také měření reologických vlastností kapalin a měření pádových rychlostí částic.

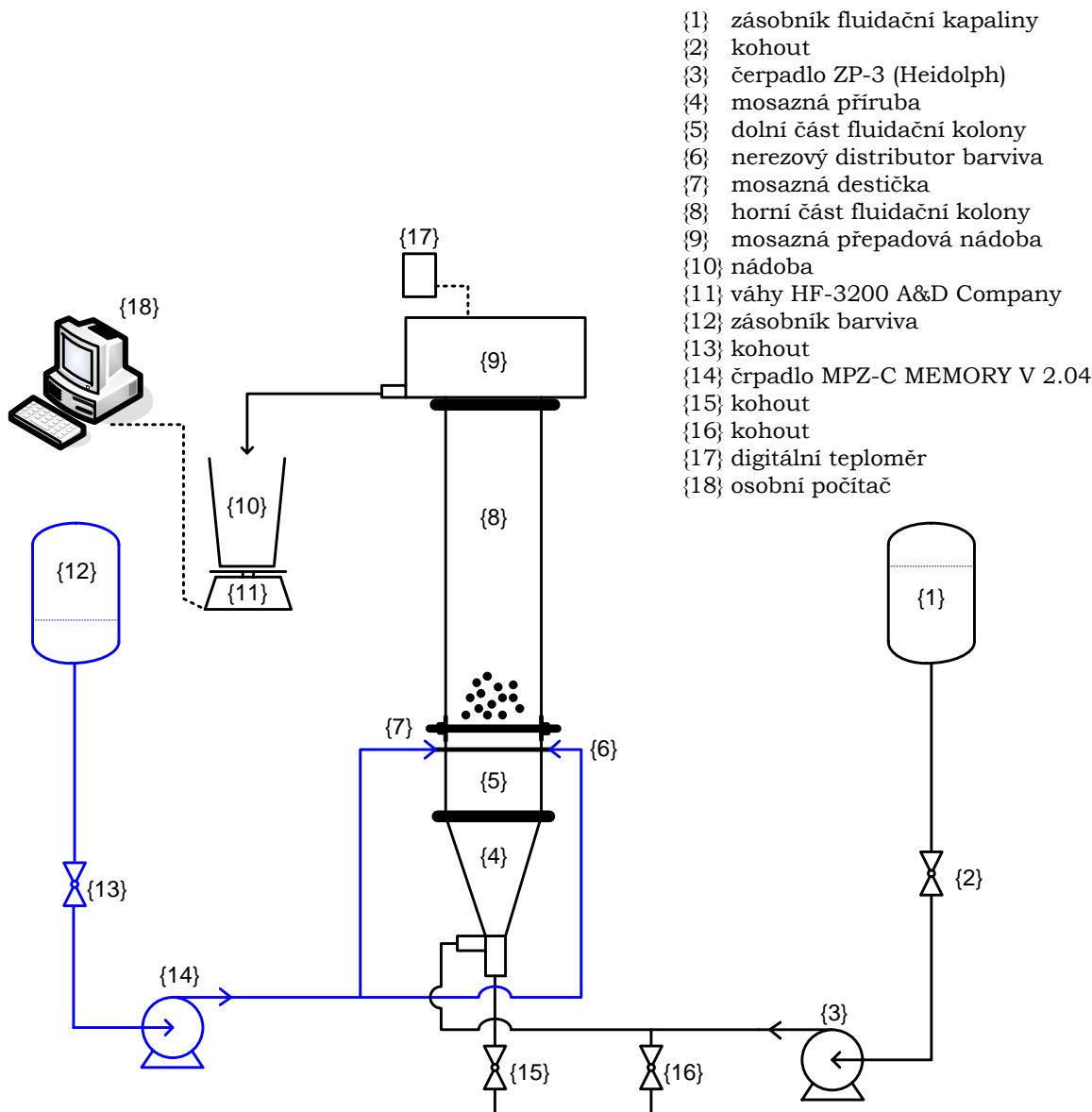
4.1 Zařízení

Fluidace

Základní částí zařízení (viz obr. 3.) pro měření expanze částic při fluidaci roztoky kapalin odlišného reologického chování byla fluidační kolona. Tato byla vyrobená z makrolonových desek a měla obdélníkový průřez v rovině kolmé k výšce kolony s jedním rozměrem strany obdélníku výrazně kratším než druhý rozměr strany obdélníku. Často se lze pro tento typ kolon setkat s názvem tzv. „dvourozměrná“ kolona. Samotná kolona byla sestavena ze dvou částí: horní o výšce 800mm a dolní o výšce 200mm, obě části mají vnitřní průřez 5x80mm. K dolní části kolony byla připevněná mosazná příruba. Mezi horní a dolní část se vkládal mosazný rošt o tloušťce 0,8mm s otvory o průměry 1mm (volná plocha cca. 11%). Na horní část kolony byla upevněna mosazná nádoba s přepadem. Pro vizuální sledování výšky expační vrstvy byla horní část kolony opatřena plastovým milimetrovým měřítkem o délce 600mm. Technické schéma kolony se základními rozměry je na obr. 2.



Obr. 2. Technické schéma fluidační kolony



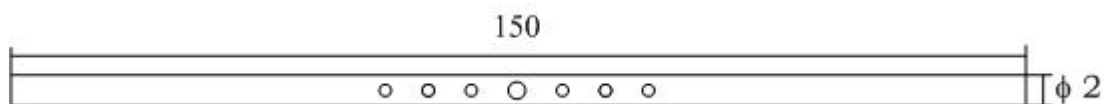
Obr. 3. Schéma fluidační sestavy

Ostatní části zařízení měly následující funkci (viz obr. 3.). Pohonná jednotka PD 5230 se zubovým čerpadlem ZP-3 {3} firmy Heidolph čerpala neobarvenou fluidační kapalinu ze zásobníku {1} přes mosaznou přírubu {4} do dolní části kolony {5}. Tok kapaliny byl usměrněn mosaznou destičkou {7} a kapalina byla dále vedena přes horní části kolony {8} do mosazné nádoby s přepadem {9} a digitálním teplotním čidlem (přesnost 0,1°C) {17} do zásobní nádoby {10}. Nádoba {10} byla umístěna na laboratorních vahách HF-3200 firmy A&D Company (přesnost 0,01g) {11} z důvodu zjišťování přírůstku hmotnosti kapaliny prošlé fluidační kolonou v závislosti na čase. Váhy byly propojeny pomocí sériového portu s osobním počítačem {18}, který pomocí programu vytvořeném v Turbo Pascalu 7 vypočítával hodnotu mimovrstvové rychlosti podle vztahu:

$$u = \frac{\Delta m}{t_{\Delta m} S \rho_L}, \quad (52)$$

kde Δm je přírůstek hmotnosti za čas $t_{\Delta m}$ průřezem kolony S .

Obarvený roztok modelové kapaliny, používaný k vizualizaci, byl veden ze zásobníku {12} pomocí čerpadla MPC-Z MEMORY V 2.04 firmy ISMATEC {14} do distributoru toku {6}, který byl umístěn pod mosazným roštem {7}. Distributor {6} byl tvořen nerezovou trubičkou o průměru 2mm a délce 150mm, do kterého byly vyvrtány otvory o různém průměru z důvodu rovnoměrného toku obarvené kapaliny podél celé šířky fluidační kolony. Celkový počet otvorů byl 7 a jejich vzájemná vzdálenost byla 7mm. Otvor ve středu trubičky měl průměr 1mm a zbývající otvory na obou stranách měly průměr 0,5mm. Rozmístění je naznačeno na schématu obr. 4. Byly odzkoušeny různé kombinace průmětů otvorů pro rovnoměrný nátok obarvené kapaliny, až byla vybrána popsaná a vyobrazená kombinace.



Obr. 4. Schéma rozložení otvorů nerezového distributoru

Reologické vlastnosti kapalin

Reologické vlastnosti kapalin byly proměřovány na zařízení firmy HAAKE, reometru RS 150 RheoStress (obr. 5.) v uspořádání válec – válec (Z40 DIN Ti).



Obr. 5. Reometr RS 150 RheoStress

Pádová rychlost částic

Pádové rychlosti částic bylo změřeno ve válcové koloně z plexiskla o vnitřním průměru 40mm a délce 800mm. Kolona měla podél výšky vyznačeny rysky s odstupem 50mm a na dně kolony byla opatřena výpustí.

4.2 Částice

Pro experimentální měření expanze částic při fluidaci kapalinami odlišného reologického chování byly vybrány soubory monodisperzních skleněných kuliček, a to skleněné částice červené barvy (o průměru 2,423mm a 2,010mm) a číré skleněné částice (průměr 1,460mm). Částice byly vybrány tak, aby mohly tvořit příp. více vrstev při vlastní fluidaci v koloně, jejíž hloubka byla 5mm. Číré skleněné částice mohly tvořit teoreticky tři vrstvy za sebou a červené skleněné částice dvě vrstvy. Pro zjištění základních fyzikálních charakteristik částic (tab. 1.) bylo vybráno reprezentativní množství. Hustota částic byla zjišťována pyknometricky a jejich velikost (průměr) pomocí mikrometru.

4.3 Kapaliny

Jako fluidační kapaliny byly použity vodné roztoky Emkaroxu (ozn. HV 45, newtonská kapalina, polyoxyalkylen glykol, fa Uniqema), Natrosolu (ozn. MGM 003 250 HHR, neneutonská kapalina, hydroxyethylcelulóza, fa Herkules Powder Company) a Praestolu (ozn. 2935/74, neneutonská kapalina, polyakrylamid, fa Chemische Fabrik Stockhausen GmbH).

Roztok Emkaroxu byl připraven smícháním potřebného množství destilované vody a Emkaroxu. Roztoky Natrosolu a Praestolu byly připraveny smícháním práškové navážky s potřebným množstvím destilované vody. Pro lepší rozpouštění a zabránění následné biodegradace bylo k roztoku Natrosolu přidán 36% vodného roztoku formaldehydu (5ml na 1000ml roztoku). Roztoky byly vždy den míchány a noc stály (ponechány v klidu). Jednotlivé charakteristiky při 23°C jsou uvedeny v tab. 2. (hustota jednotlivých roztoků byla měřena pyknometrickou metodou).

Obarvené roztoky byly připraveny přidáním potřebné navážky barviva (methylenové modři). Koncentrace barviva byla určena u jednotlivých roztoků experimentálně tak, aby se co nejméně změnil reologické vlastnosti jednotlivých roztoků a byla získána dostatečná sytost barveného roztoku. Jednotlivé koncentrace jsou uvedeny v tab. 3.

4.4 Popis měření

Expanze vrstvy částic

Pro měření expanzní vrstvy byly uzavřeny kohouty {15}, {16} a kohout {13} (obr. 3). Následně byl otevřen kohout {2}. Kolona byla napuštěna fluidační kapalinou pomocí čerpadla {3} a přes mosaznou přepadovou nádobu {9} byla nasypána předem známá navážka skleněných částic. Navážka byla volena

tak, aby nehybná vrstva částic v koloně dosáhla výšky cca. 10cm. Poté se zkontrolovala svislá poloha kolony pomocí olovnice. Obsahovala-li kolona bublinky, nechala se kolonou protékat fluidační kapalina do odvodušnění.

Měření expanze vrstvy částic bylo zahájeno spuštěním čerpadla {3} a jeho následnou regulací pomocí bypassu (obtoku) byl nalezen „nejmenší“ průtok, kdy došlo k pohybu (expanzi) částic (Bypass byl vestavěn v čerpací hlavici a umožňoval ruční regulaci průtoku.). Od této hodnoty se v pravidelných intervalech zvýšení průtoku měřilo dále.

Vždy po změně průtoku se vyčkalo na ustálení mimovrstvové rychlosti, která byla sledována pomocí osobního počítače {18}. Spolu s odečtenou ustálenou hodnotou rychlosti se také zaznamenala průměrná výška vrstvy a teplota fluidační kapaliny na výstupu z kolony. Opět se zvýšil průtok a měření bylo opakováno do té doby, než bylo dosaženo maximální možné rychlosti pro systém. Tímto způsobem byla proměřená škála rychlostí pro daný systém a změřena výška expanzní vrstvy. Experimentálně zjištěná data sloužila k sestavení expanzní křivky a kalibraci čerpadla při vizualizaci toku kapaliny fluidní vrstvou částic (viz vizualizace vrstvy, níže).

Po skončení měření byla kapalina vypuštěna pomocí ventilů {15} a {16}. Vyprázdněn byl také zásobník {1} a celá kolona se promyla vodou. Následně byla kolona rozmontována v místě roštu {7} a částice byly vyjmuty.

Reologické vlastnosti kapalin

Reologické vlastnosti kapalin (tokové křivky) byly měřeny pomocí rotačního reometru při teplotě, za které probíhala fluidace (21 – 24°C). Pro měření byl použit systém válec – válec Z 40 DIN Ti. Měření probíhalo v režimu řízené rychlosti deformace (CR mód) s dobou ustálení 5 sekund („kroková“ křivka). Měření bylo provedeno v rozsahu rychlostí deformace 0,01–1000s⁻¹ v 60 bodech s logaritmickou distribucí.

Pád částic

Pro měření pádových rychlostí kulových částic se kolona naplnila fluidační kapalinou a zkontrolovala se její svislá poloha za pomoci olovnice. Doba pádu kulové částice se měřila digitálními stopkami na dráze 100 – 500mm. Délka byla volena tak, aby pád částice trval cca. 30s. Takto se určila doba pádu pro 10 částic a následně se určila její průměrná hodnota.

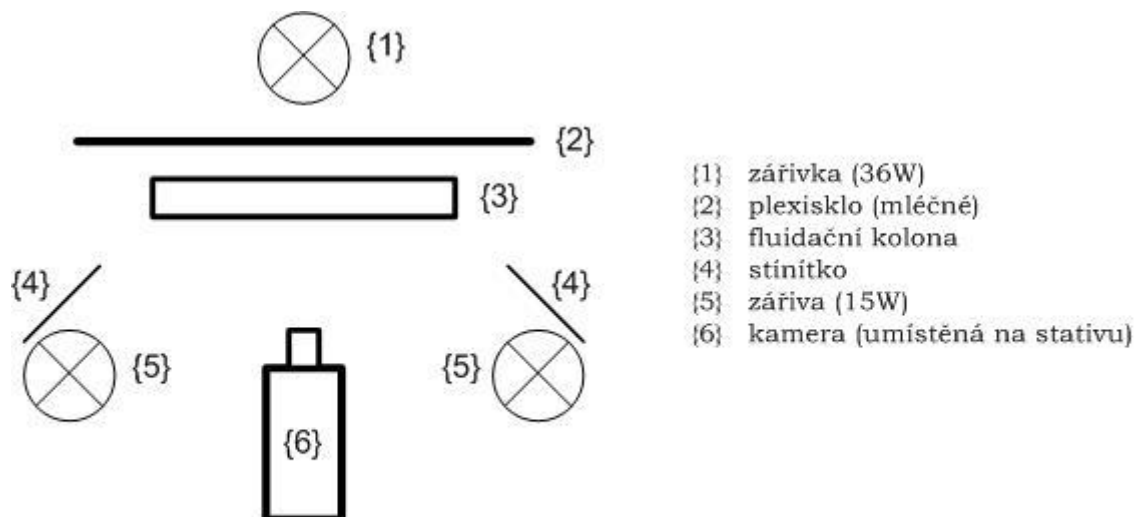
Videozáznam fluidace a vizualizace toku fluidní vrstvou

Pro vizualizaci, záznam expanze částic a toku kapaliny vrstvou byl systém opatřen světly a kamerou umístěnou na stativu. Světla byla rozsvícena cca. 10min. před samotným snímáním, tak aby došlo k ustálení intenzity světla. Kamera byla otočena o 90° ze své horizontální polohy. Bylo to z důvodu získání většího rozlišení záznamu, rozlišení kamery bylo 768 × 576 pixelů.

Umístění světel bylo voleno tak, aby osvětlení pracovní scény bylo homogenní a nedošlo k nárůstu tzv. clonového čísla z důvodu velké intenzity

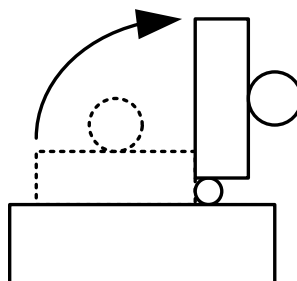
světla (čím je clonové číslo menší, tím je clona více otevřená). Z testovaných kombinací bylo voleno rozmístění a počet bočních a zadních světel.

Jako nejvhodnější se ukázalo rozmístění jednoho zadního světla {1}, před které byla umístěna deska z mléčného plexiskla {2} a dvou bočních světel {5} zacloněných proužkem kartónu {5} (obr. 6.). Použitá světla byly rtuťové výbojky (zářivky) – zadní o délce 117cm a příkonu 36 W, boční o délce 42cm a příkonu 15 W.



Obr. 6. Rozmístění komponent pro záznam (půdorys)

Obraz pracovní scény se snímal na mini-DV kameru MVX250i (výrobce Canon, CCD čip s 1,33 Mpixely, ukládané video v normě PAL – 25 snímků v rozlišení 768 × 576 pixelů za sekundu) {6} vzdálenou od kolony {3} cca. 75cm. Kamera byla umístěna na stativu, který umožňoval pohyb ve vertikální poloze pomocí ozubené výsuvné části stativu a hlavičky stativu byla opatřena kloubem, který umožňoval její vyklopení o 90° (obr. 7.).



Obr. 7. Schéma hlavičky stativu

Z testovaných způsobů čerpání obarvené modelové kapaliny při vizualizaci toku kapaliny fluidní vrstvou byl vybrán ten, který nejméně ovlivňoval průběh expanze fluidní vrstvy. Jako nejvhodnější způsob z testovaných postupů se ukázalo nastavení otáček obou čerpadel pomocí

kalibračních dat na stejnou mimovrstvovou rychlost a do činnosti se uvádělo vždy jen jedno z nich.

Při vizualizačních experimentech toku kapaliny fluidní vrstvou částic byly nejprve kohouty {15}, {16} a kohout {13} uzavřeny, čerpadlo {14} bylo vypnuto (obr. 3.). Otevřený byl kohout {2} a čerpadlo {3} bylo uvedeno do provozu. Vyčkalo se na ustálení mimovrstvové rychlosti, tedy i výšky fluidní vrstvy. Poté byla spuštěna kamera, která zaznamenávala průběh vrstvy částic na záznamové médium (kazeta miniDV). Vlastní zavádění obarveného roztoku modelové kapaliny bylo uskutečněno tak, že se nejprve otevřel kohout {13}, pustilo čerpadlo {14} a vypnulo čerpadlo {3}, uzavřel kohout {2}. Po zaplnění vrstvy barvivem byl ukončen záznam na kameru. Tímto postupem byla zachována stejná výška fluidní vrstvy a přitom obarvená kapalina protékala celým průřezem kolony, nedocházelo tak ani k „pulzací“ vrstvy způsobené pamětí kapaliny.

Z kalibračních dat, které byly získány z kalibrace čerpadla, pro expanzní vrstvu bylo pro každý systém vybráno 4–5 mimovrstvových rychlostí pro účely vizualizace toku kapaliny fluidní vrstvou. Výběr mimovrstvových rychlostí byl pro každý systém individuální. Vybrané mimovrstvové rychlosti jsou uvedeny pro Emkarox v tab. 17., 19., 21., pro Natrosol v tab. 23. – 25. a Praestol v tab. 26. – 28. Teplota, při které probíhaly experimenty, byla v rozmezí 21 – 24°C.

5. Vyhodnocení dat

Pro orientaci dat byl zvolen systém zkratk uvedený v tabulkách 1., 2. a 3. Systémy jsou značeny *kapalina_částice_číslo záznamu_barvivo*. Označení *a* a *b* u čísla snímku znamená, že fluidní vrstva dosáhla takové výšky, že záběr celé fluidní vrstvy podél její výšky nebyl z hlediska uspořádání aparatury a kamery možný a záznam byl tedy proveden tak, že se pořídil záznam spodní části vrstvy a pak horní části vrstvy.

5.1 Reologická data

Naměřené tokové křivky pro jednotlivé systémy byly nahrazeny Carreauovým (7) nebo mocninovým (6) modelem. Parametry modelů byly určeny minimalizací sum relativních odchylek δ :

$$\delta = \frac{\tau_{\text{vyp}} - \tau_{\text{exp}}}{\tau_{\text{exp}}}, \quad (52)$$

kde τ_{vyp} je tečné napětí vypočtených hodnot a τ_{exp} je tečné napětí naměřených hodnot. Parametry jednotlivých modelů jsou uvedeny v tabulkách 4. a 5. (Pro parametry Carreauova modelu není uveden symbol částice, protože pro všechny měřené systémy dané kapaliny byla použita stejná kapalina.) Vliv teploty na dané systémy v rozmezí 21 – 24°C byl proměřen. Bylo zjištěno, že u Emkarox je odchylka součinitele konzistence K 6,2%, u Natrosolu byla dolní limitní viskozita η_0 s odchylkou 4,3% a u Praestolu 2,8% (další parametry byly u neneutonských kapalin srovnatelné).

5.2 Pádová rychlost

Pádová rychlost byla určena ze vztahu:

$$u_t = \frac{l}{\bar{t}}, \quad (53)$$

kde l je délka měřeného úseku pádu částice a \bar{t} je průměrná hodnota pádu na úseku l . Pro získání pádu částice v neomezeném prostoru byla rychlost korigována podle vztahu:

$$F_w = \frac{u_t}{u_{t,\infty}}, \quad (54)$$

kde $u_{t,\infty}$ je pádová rychlost v neomezené kapalině.

Pro newtonskou kapalinu Emkarox se pro výpočet parametru F_w použil Faxenův vztah:

$$F_w = 1 - 2,104 \frac{d}{D} + 2,09 \left(\frac{d}{D} \right)^3 - 0,95 \left(\frac{d}{D} \right)^5. \quad (55)$$

Pro neneutonské kapaliny Natrosol a Praestol byl použit vztah [60]:

$$F_w = 1 - 1,3 \left(\frac{d}{D} \right)^{0,94} (2\Lambda_t)^{-0,077}, \quad (56)$$

kde Λ_t je dáno vztahem (35). Platnost vztahu je v rozsahu $0,005 < \frac{d}{D} < 0,5$; $n > 0,4$ a $0,9 < 2\Lambda_t < 300$.

Vypočtené hodnoty korekčních faktorů F_w pádové rychlosti, pádové rychlosti v neomezené kapalině a hodnoty Reynoldsových kritérií – Re_t (18) a $Re_{t,c}$ (36) jsou uvedeny v tabulkách 6. a 7.

5.3 Expanze fluidní vrstvy

Zjištěné hodnoty mimovrstvových rychlostí a jednotlivé výšky fluidní vrstvy h byly použity pro výpočet dalších veličin jako např. bezrozměrná mimovrstvová rychlost, mezerovitost vrstvy atd. Bezrozměrná mimovrstvová rychlost byla určena podle vztahu:

$$u_B = \frac{u}{u_{t,\infty}}, \quad (57)$$

kde u_B je bezrozměrná rychlost, u je mimovrstvová rychlost a $u_{t,\infty}$ je pádová rychlost v nekonečném prostoru.

Z výšky fluidní vrstvy h byla vypočtena ze znalosti navážky m_s , pro jednotlivé systémy, mezerovitost ε fluidní vrstvy podle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{hab - \frac{m_s}{\rho_s}}{hab}, \quad (58)$$

kde a a b jsou rozměry kolony (šířka a hloubka).

Naměřené hodnoty mimovrstvových rychlostí, výšek fluidní vrstvy a vypočtené hodnoty bezrozměrných rychlostí, mezerovitostí s příslušnými hodnotami Reynoldsových kritérií Re resp. Re_c jsou v tabulkách 8. – 16. Závislosti $u_B = f(\varepsilon)$, expanzní křivky byly vyneseny v logaritmických měřících (vždy pro jednu velikost částic) do grafu. Příslušné expanzní křivky jsou uvedeny v grafech 1. – 3.

5.4 Zpracování a analýza obrazu

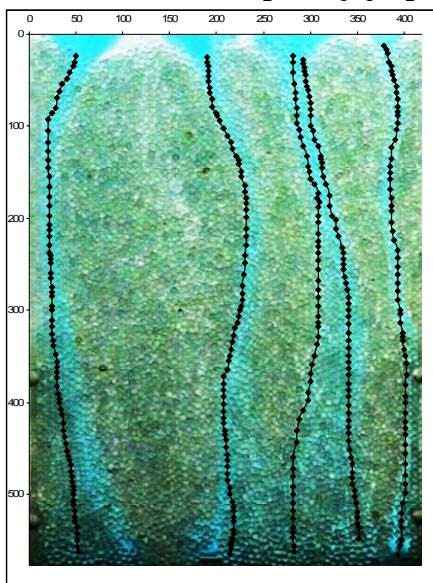
Záznam z digitální kamery byl zkopírován pomocí rozhraní FireWire na osobní počítač a „vypálen“ na přenosné médium DVD, bez následné komprese.

Vybrané sekvence byly zpracovány pomocí programu VirtualDub v1.6.12 (www.virtualdub.org/). Na vybranou část se aplikoval filtr *Rotate – Right by 90°* a příkazem *Cropping* byl záznam ořezán na šířku kolony a výšku fluidní vrstvy. Záznam se pak uložil (*Save image sequence*) jako soubor statických obrázků ve formátu BMP.

Samotná analýza obrazu byla provedena v programu ImageJ v1.36 [61], který byl rozšířen o pluginy, potřebné pro další zpracování obrázků. Pomocí příkazu *Import – Image sequence* byl načten soubor statických obrázků do tzv. zásobníku (*Stack*), což je sled obrázků za sebou v jediném otevřeném programovém okně (procházení tohoto zásobníku umožňuje animaci nahraných obrázků – děje v nich zaznamenaných). Volbou parametru *Inkrementy* bylo předepsáno kolik obrázků se má z celkové sekvence záznamu expanze vrstvy částic nahrát do zásobníku, a tím byl určen i časový interval mezi jednotlivými snímky. Takto načtená sekvence obrázků se uložila (*Save as – Tiff*) jako vícestránkový soubor a byla připravena pro další zpracování.

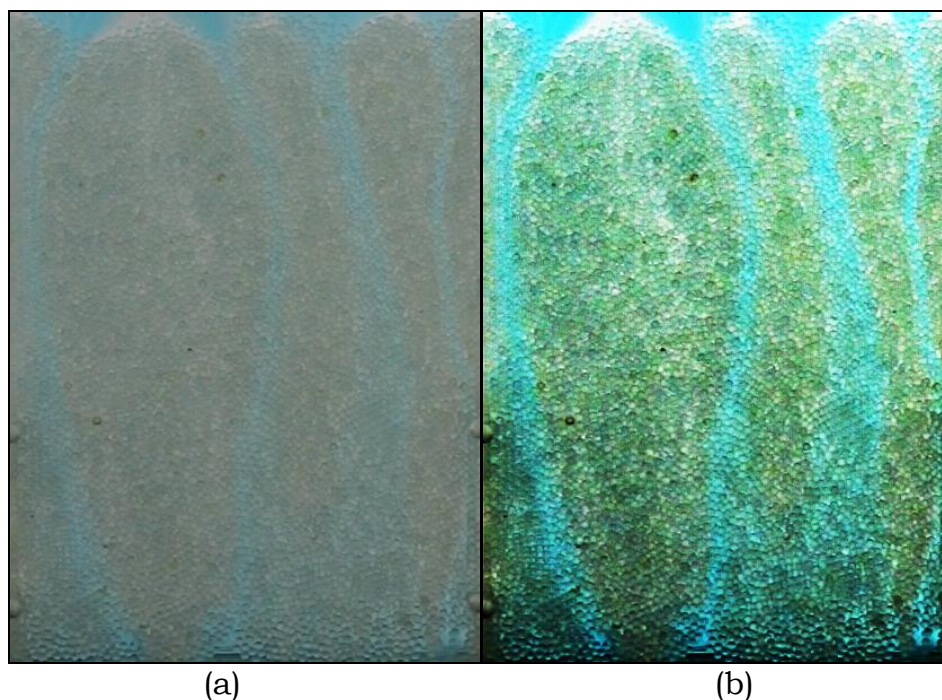
5.4.1 Stanovení experimentální rychlosti uvnitř fluidní vrstvy

Pro stanovení experimentální rychlosti uvnitř fluidní vrstvy se nejprve aplikoval příkaz *Enhance Contrast* na ekvalizaci histogramu každého snímku v sekvenci. Za pomoci doinstalovaného pluginu *Manual Tracking* (<http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/track/track.html>) bylo sledováno čelo obarvované kapaliny a ze znalosti trajektorie (mezi pozicemi čela) a času (časového intervalu mezi snímky) byla určena experimentální rychlost. Ukázka dráhy jednotlivých čel obarvené kapaliny je prezentována na obr. 8.



Obr. 8. Ukázka výsledků použití pluginu *Manual Tracking pro systém PR_M_4_MM*: pozice (•) čela obarvené kapaliny v jednotlivých kanálech v daných časových okamžicích a trajektorie (-) jejího čela podél výšky kolony

Demonstrace příkazu *Enhance contrast* je na obr. 9. Snahou bylo proměřit co nejvíce trajektorií čel obarvené kapaliny pro získání rychlostí v jednotlivých částech sekvence (minimální počet stanovovaných rychlostí pro sekvenci byl 3).



Obr. 9. Demonstrace příkazu *Enhance Contrast* (PR_M_4_MM)
 (a) původní obrázek
 (b) ekvivalizovaný snímek

5.4.2 Mezerová rychlost

Pro newtonský roztok Emkaroxu byla pozorována přibližně homogenní fluidace, a z tohoto důvodu se neurčovaly parametry zónového modelu pro agregativní fluidaci.

Naměřená data hodnot výšek, mezerovitostí, bezrozměrných a mimivrstvových rychlostí s příslušnými hodnotami Reynoldsových kritérií Re při vizualizaci vrstvy roztoku Emkaroxu jsou uvedeny v tab. 17., 19. a 21. V tabulkách 18., 20. a 22. jsou porovnány (vypočtena relativní odchylka) experimentální a naměřené mezerové rychlosti (experimentální mimovrstvová rychlost byla vypočtena z rovnice (11)).

5.4.3 Zónový model

Pro neneutonské kapaliny (Natrosol a Preastol) byla získaná experimentální rychlost porovnána s vypočtenou rychlostí v kanálcích získanou pomocí zónového modelu.

Veličiny u , $u_{t,\infty}$ a ε byly stanoveny v předcházejících výpočtech této práce na základě provedených experimentů expanze fluidní vrstvy.

K hodnocení zónového modelu bylo třeba stanovit poměr průřezu kanálků S_{ch} a celkovému průřezu S . Protože záznam dovoluje získat pouze plochy těchto útvarů, byl poměr vyjádřen:

$$\frac{S_{ch}}{S} = \frac{S_{ch} h}{S h} = \frac{\dot{V}_{ch}}{\dot{V}} = \frac{A_{ch}(t-xd)}{At} = \frac{\chi A_{ch}}{A}, \quad (59)$$

kde A_{ch} je plocha průmětu kanálků, A je plocha průmětu expanzní vrstvy, h je výška fluidní vrstvy, t je tloušťka kolony, x je počet kuliček netvořící kanál a χ je převrácená hodnota stupně pokrytí šířky kolony definována jako:

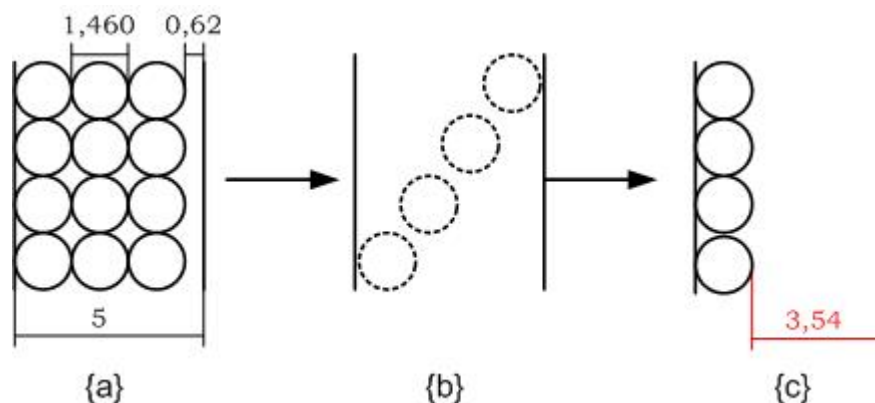
$$\chi = \frac{t}{t-xd}. \quad (60)$$

Rozdíl $(t-xd)$ byl nadefinován pro jednotlivé částice (obr. 10., 11., 12.). Z měření bylo vyzorováno, že u částice M se může tvořit kanál ve směru hloubky fluidační kolony o tloušťce, která je dána dvojnásobkem jeho průměru, u částice S a V se může tvořit kanál o tloušťce průměru částice. Volný prostor ve směru hloubky kolony, který nebyl vyplněn částicemi se připočítával k tloušťce kanálu. Tento postup byl aplikován na všechny systémy Praestolu a systémy Natrosolu při nízkých rychlostech.

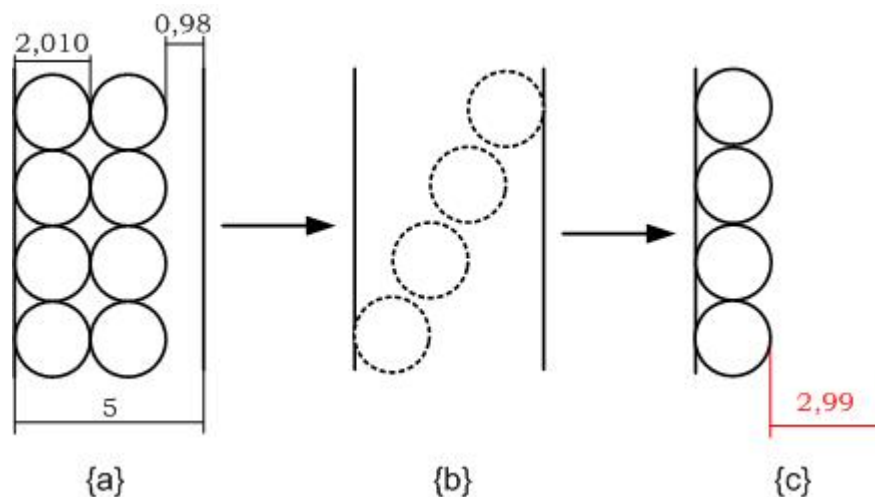
Pro Natrosol při vysoké mimovrstvové rychlosti, kdy obarvená kapalina již netvořila stálé viditelné kanály, se předpokládalo, že kanály vznikají a zanikají pouze ve volném prostoru, přes celý průřez kolony, mezi částicemi. Pro určení poměru průřezu bylo použito vztahu:

$$\frac{S_{ch}}{S} = \frac{S_{ch} h}{S h} = \frac{\dot{V}_{ch}}{\dot{V}} = \frac{A'_{ch}}{A}, \quad (61)$$

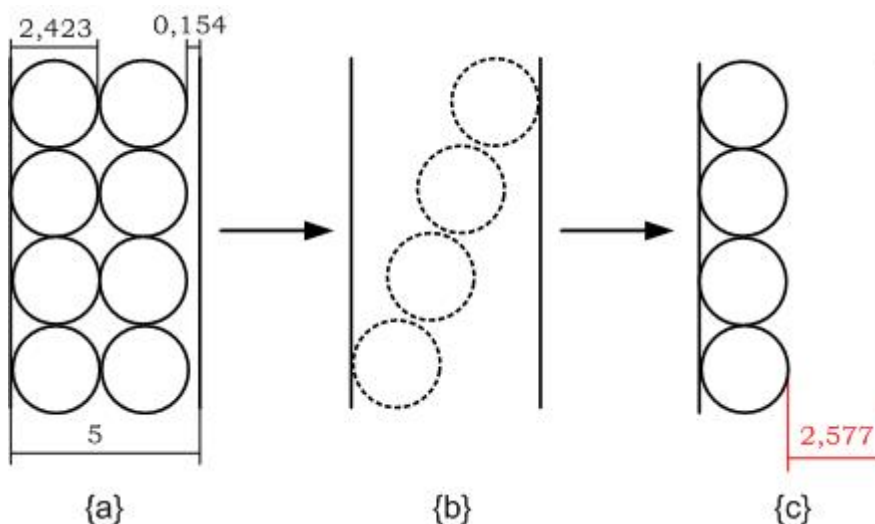
kde A'_{ch} je plocha průmětu volného prostoru mezi částicemi přes celý průřez kolony.



Obr. 10. Modelové obrázky tloušťky kanálu – částice M



Obr. 11. Modelové obrázky tloušťky kanálu – částice S



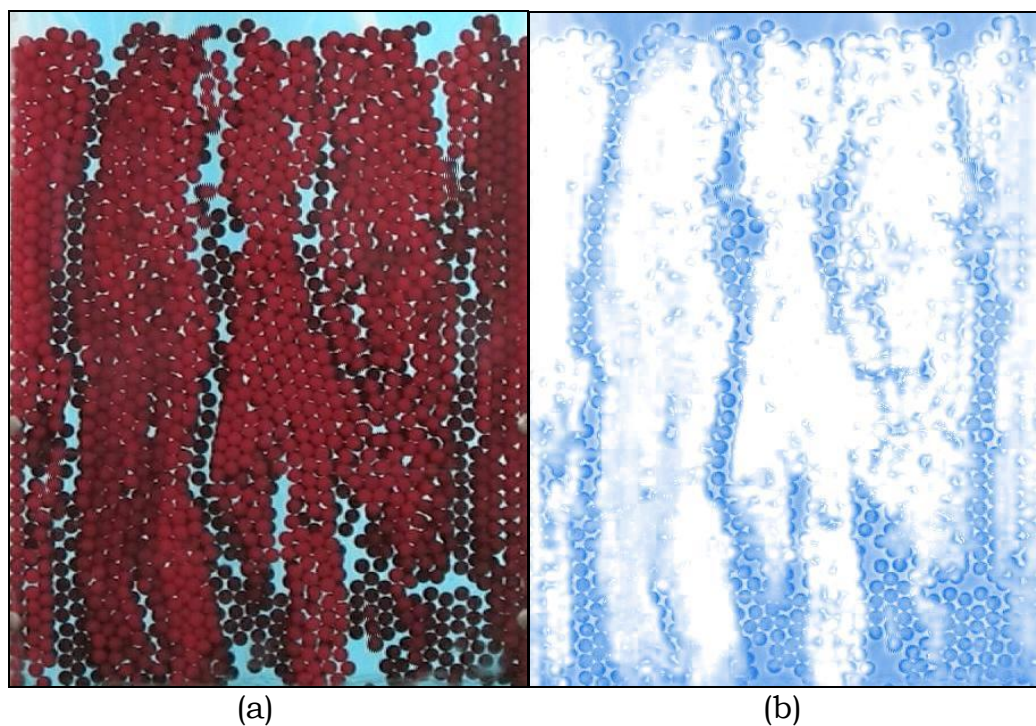
Obr. 12. Modelové obrázky tloušťky kanálu – částice V

(Dodatek k obr. 10., 11., 12.: {a} modelový předpoklad rozložení částic tvořící nehybnou vrstvu, jakékoli umístění částice ve fluidní vrstvě {b} se bralo jako homogenní monodisperzní vrstva částic {c} o šířce kanálu (viz kóta).)

K určení ploch průmětu kanálů A_{ch} byly použity pluginy:

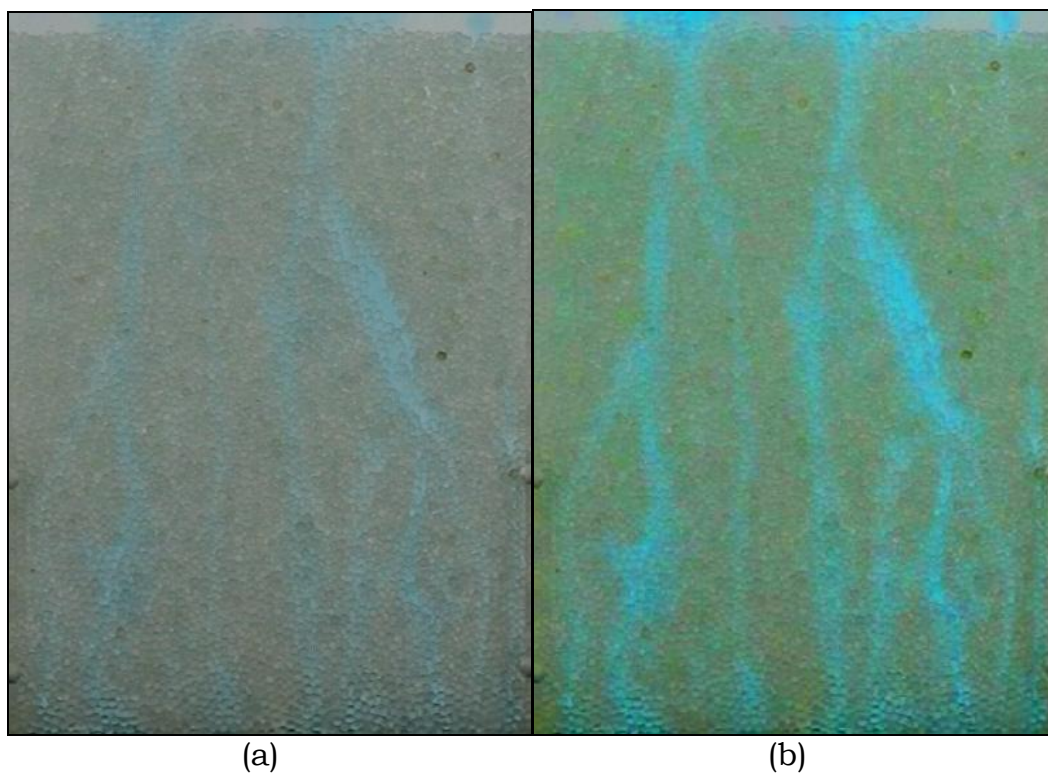
Color Inspektor 3D (<http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/color-inspector.html>), *Threshold Color*, *Colour Deconvolution* (oba stažitelné na adrese <http://www.dentistry.bham.ac.uk/landinig/software/software.html>).

Colour Deconvolution – plugin rozdělující snímek na jednotlivé barvy podle předem definovaného odstínu (obr. 13.).



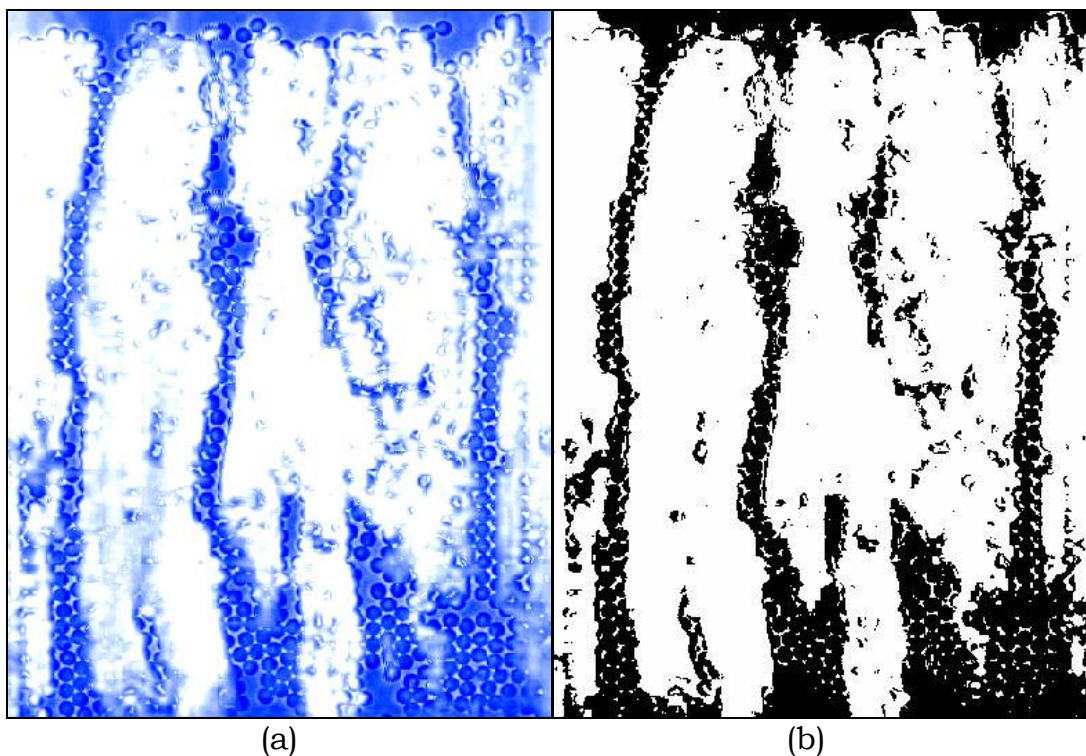
Obr. 13. Demontrace funkce *Colour Deconvolution* (PR_V_4_MM)
(a) před, (b) po

Color Inspektor 3D – podprogram umožňující upravovat sytost, jas obrázku a otočení jeho barevného spektra (obr. 14.).



Obr. 14. Demontrace funkce *Colour Inspektor 3D* (PR_M_2_MM)
(a) před, (b) po

Threshold Color – naprahování obrázku ve formátu RGB (obr. 15.).



Obr. 15. Demonstrace funkce *Threshold Colour* (PR_V_4_MM)
((a) před, (b) po)

Další používané příkazy byly: *8-bit* – převedení barevného rozhraní RGB obrázku na 8 bitový (obrázek odstínů šedi), *Dilate* – rozšíření naprahovaných částí obrázku, *Clear Outside* – vymazání okolí mimo vyznačenou oblast barvou pozadí, *Despeckle* – odstranění šumu, *Enhance Contrast* – ekvalizace histogramu snímku, *Measure* (s parametrem *Area*) – změření plochy označené oblasti, *Outline* – zobrazení okrajů objektů zájmu, *Wand* – označení oblasti stejné barvy nebo naprahovaných objektů.

Pro analýzu jednotlivých modelových systému byla snaha vypracovat metodiku, která by vyhovovala pro proměření celého systému pro danou částici a kapalinu.

Obecným postupem bylo zvýraznění plochy kanálů pomocí pluginu *Colour Deconvolution* nebo *Color Inspektor 3D*. Následovalo naprahování pomocí pluginu *Threshold Color*, v barevném kódování *YUV*. Nechtěný šum byl odstraněn příkazem *Despeckle*. Kódování barev snímků bylo převedeno na stupeň šedi příkazem *8-bit*. Příkazem *Outline* byly jednotlivé plochy A_{ch} tvořící kanál „obkresleny“. Jednotlivé plochy byly nástrojem *Wand* označeny a příkazem *Measure* s parametrem *Area* změřena jejich plocha (v pixelech). Stejným příkazem se vypočetla i celková plocha fluidní vrstvy. Data se dále přepočítávala pomocí převodního poměry, kdy je známa výška fluidní vrstvy a její šířka (8cm). Z průměru jednotlivých rozměrů byla plocha přepočítána z pixel^2 na cm^2 .

Jednotlivé systémy byly zpracovávány postupem:

Natrosol

Při nízkých rychlostech bylo na systémy **NA_M**, **NA_S**, **NA_V** bylo použito postupu vyhodnocení ve sledu následujících příkazů:

originál – *color inspektor 3D* – *threshold color* – *despeckle* – *cut* – *outline*

Při vyšších rychlostech, kdy systémy přestaly tvořit stálé kanály, bylo použito jiného sledu příkazů:

NA_M:

originál – *enhance contrast* – *threshold color* – *despeckle* – *cut* – *outline*

NA_S a NA_V:

originál – *threshold color* – *despeckle* – *cut* – *outline*

Praestol

Na originální obrázek bylo postupně aplikováno vyhodnocení:

PR_M:

originál – *color inspektor 3D* – *threshold color* – *despeckle* – *cut* – *outline*

PR_S:

originál – *color deconvolution* – *color inspektor 3D* – *threshold color*
– *despeckle* – *invert* – *despeckle+dolare* – *cut* – *outline*

PR_V:

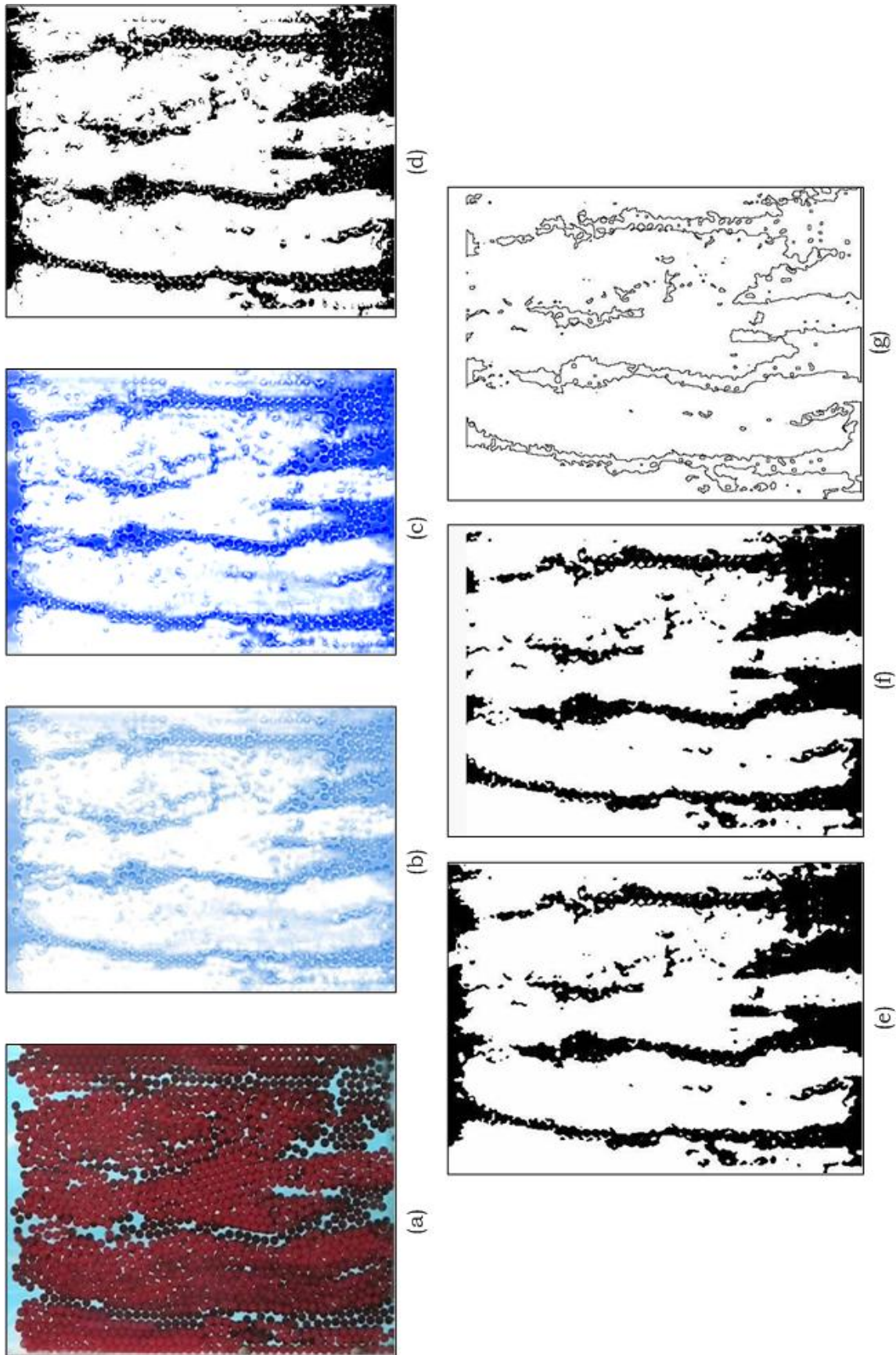
originál – *color deconvolution* – *color inspektor 3D* – *threshold color*
– *despeckle* – *cut* – *outline*

Použité výrazy:

cut – znamená příkaz *Clear Outside* a spojení prázdných míst v kanálcích tak, aby při počítání plochy nebyly brány v úvahu

invert – znamená otočení 8bit barvy, příkazem *Threshold*

Obrazový postup zpracování systému je na obr. 16.



Obr. 16. Demonstrace zpracování obrázku systému PR_V_4_MM
 (a) originál, (b) *color deconvolution*, (c) *color inspektor 3D*, (d) *threshold color*, (e) *despeckle*, (f) *cut*, (g) *outline*

Jednotlivé plochy byly přepočteny podle rovnice (59) resp. (61) a takto stanovený poměr $\frac{S_{ch}}{S}$ byl použit pro výpočet ε_1 z rovnice (47).

Hodnota korekčního faktoru F_w pro obdélníkovou kolonu byla vypočtena z rovnice:

$$F_w = \frac{1}{1 + 1,788 \left[1 - (1 - m)(2\Lambda_t)^{0,0211} \right] \left(\frac{d}{D_E} \right) + 0,488 \left(\frac{d}{D_E} \right)^2}. \quad (62)$$

Fluidace probíhala v plouživé oblasti a hodnota koeficientu v Richardson – Zakiho rovnici byla $z = 4,71$.

Na základě takto zjištěných dat se určil faktor f pomocí rovnice (51) a rychlosti v kanálcích u_{ch} z rovnice (47).

Pro roztok Praestolu se určoval faktor kroutivosti q , který je definován jako podíl celkové dráhy uražené čelem obarvené kapaliny l_c a teoretické dráze uražené ve svislé poloze:

$$q = \frac{l_c}{L}. \quad (63)$$

Naměřená data hodnot výšek, mezerovitostí, bezrozměrných a mimovrstvových rychlostí s příslušnými hodnotami Reynoldsových kritérií Re_c při vizualizaci vrstvy roztoku Natrosolu jsou uvedeny v tab. 23. – 25. a roztoku Praestolu v tab. 26. – 28. Výsledky získané z experimentálních dat a pomocí zónového modelu pro systém Natrosol – částice jsou uvedeny v tab. 29. – 31. a pro systémy Praestol – částice v tab. 32. – 34. V těchto tabulkách jsou uvedeny získané parametry modelu, hodnoty experimentálních rychlostí s relativní odchylkou (porovnání s rychlostí získanou pomocí zónového modelu) a hodnoty kroutivosti kanálů. Vypočtené parametry zónového modelu ε , ε_1 , f , u_{ch}/u jsou taktéž vyneseny v závislosti na mimovrstvové rychlosti u_B do grafů 4. – 9.

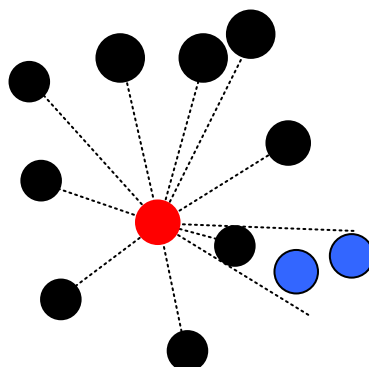
5.4.4 Hodnocení fluidní vrstvy pomocí „nejbližšího souseda“

Na vybrané systémy byl odzkoušen plugin *Distance*, který byl vytvořen v programovacím jazyku Java (pro program ImageJ).

Distance hodnotí vzájemnou vzdálenost částic mezi sebou ve fluidní vrstvě. Plugin zpracovává thresholdovaný obrázek v 8bitovém barevném kódování tak, že nalezne všechny částice o zadaném průměru. A pak z každé částice změří relativní vzdálenost (vzdálenost částic dělená velikostí částice) k nejbližším sousedům, kteří nejsou v zákrytu, pod jednotlivými úhly.

Demonstrace měření je ukázáno na obr. 17., kdy červená částice představuje střed měření od které se měří relativní vzdálenost k nejbližším

sousedům. Černé částice jsou nejbližší sousedi a modré částice jsou částice v zákrytu.



Obr. 17. Demonstrace „paprskového způsobu“

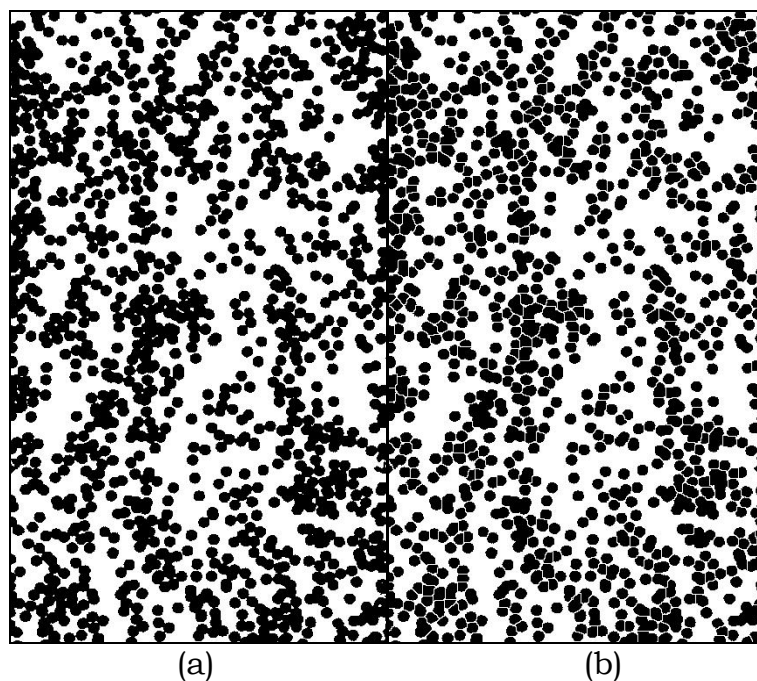
Výsledky podávají informaci o relativních vzdálenostech částic pod jednotlivými úhly.

Při tvorbě tohoto pluginu jsem vypomáhal programovou realizací maker, které vedly ke konečnému pluginu *Distance*.

Před použitím hodnotícího pluginu byly obrázky modelových systémů upraveny jednotným postupem:

originál – 8-bit – threshold – watershed

Příkaz *Watershed* rozdělí thresholdovaný obrázek na segmenty (v tomto případě na segmenty odpovídající částicím, obr. 18.). Příkaz byl použit pro oddělení částic tvořící shluky.



Obr. 18. Demonstrace příkazu *Watershed* (NA_V_3a)
 ((a) tresholdovaný obrázek, (b) obrázek po aplikaci *Watershed*)

Plugin *Distance* je ve fázi výzkumu. Byl prozatím testován z hlediska možnosti posouzení homogenity systémů fluidních vrstev. Hodnocení bylo provedeno pro systémy EM_V_6a, NA_V_3a a PR_V_4 (odpovídají přibližně stejné hodnotě mimovrstvové rychlosti) a hodnocení je uvedeno ve formě polárních grafů 10. – 12. Pro lepší přehlednost a hodnocení jsou uvedeny grafy v rozmezí stupňů 0° - 360° , i když vzdálenost mezi vybranou dvojicí je měřena dvakrát a je uvedena pod dvěma hodnotami úhlů se vzájemným rozdílem 180° (graf je symetrický kolem horizontální osy).

6. Rozbor a diskuze výsledků

6.1 Experimentální zařízení

Pro volbu vhodného distributoru obarvené modelové kapaliny se volila kombinace a počet děr pro rovnoměrný nátok obarvené kapaliny. Pro lepší distribuci obarvené kapaliny se ukazuje, že by bylo vhodné vyrobit distributor pro každý systém zvlášť.

Použitá kombinace rozmístění světel pro osvětlení pracovní scény byla vybrána z různých pokusných variant na základě proměření homogenity jasu na pozadí prázdné fluidační kolony. Kritériem pro výběr rozmístění světel byl co nejmenší rozptyl jasu a nepřiliš velká intenzita světla, která by vedla k nárůstu tzv. clonového čísla.

Vypracovaná metoda vizualizace toku kapaliny fluidní vrstvou částic pomocí alternativního čerpání obarvené modelové kapaliny byla náročná na synchronizaci ručního přepínání čerpadel. Možným řešením by bylo připojení obou čerpadel k počítači a pomocí vhodně napsaného programu snižovat otáčky prvního čerpadla a přitom zvyšovat otáčky druhého. Je však možné, že by tímto způsobem došlo k difúzi barviva čela kapaliny.

Při nižších průtocích byla metoda zatížená chybou používaného bypassu čerpadel, který při opětovném zapnutí čerpadla dával mírně odlišný průtok než při kalibraci. Řešením by možná bylo použití škrťacího ventilu na výtlačné části potrubí vedoucí do kolony nebo umístění obtoku kolem čerpadla se škrťacím ventilem.

6.2 Expanze vrstev částic

Při fluidaci newtonským roztokem Emkaroxu je fluidní vrstva přibližně rovnoměrná. Pozorovatelné větší shluky a řetězení částic jsou místního charakteru a jsou způsobeny vlivem stěn zařízení a vzájemným působením částic ve vrstvách na sebe. Závislost bezrozměrné rychlosti na mezerovitosti je lineární.

U slabě pseudoplastického a elastického roztoku Natrosolu se při nižších rychlostech objevují stálé kanály typické pro silně pseudoplastické a elastické roztoky. Při vyšších rychlostech tento jev zaniká a objevují se mírně zakřivené krátké kanálky, které náhodně vznikají a zanikají. Dochází zároveň k řetězení a tvorbě shluku částic ve větší míře než při fluidaci roztokem Emkaroxu. Závislost bezrozměrné rychlosti na mezerovitosti zůstává lineární s přibližně stejnou směrnici přímky jako u Emkaroxu. Stejně hodnoty mezerovitosti je ve srovnání s roztokem Emkaroxu dosaženo při vyšší mimovrstvové rychlosti. V porovnání s roztokem Emkaroxu dochází k větší cirkulaci částic ve fluidní vrstvě.

U silně pseudoplastického a elastického roztoku Praestolu dochází k zřetelnému řetězení částic a ve fluidní vrstvě vzniká soustava mírně zakřivených kanálů. Kanály ve srovnání s roztokem Natrosolu se vyskytují v menším počtu, ale s větším průřezem, probíhají přes celou výšku expanzní vrstvy a nemají tendenci zanikat. Dosažená míra expanze je velmi malá.

Hodnoty mezerovitosti jsou při stejných bezrozměrných rychlostech výrazně nižší než u Emkaroxu nebo Natrosolu. K cirkulaci částic prakticky nedochází.

6.3 Vizualizace vrstvy a analýza obrazu

Pro vizualizaci bylo použito analytické barvivo – methylenová modř, které dávalo se všemi modelovými kapalinami modré roztoky. Reologické vlastnosti takto obarvených roztoků se měnily zanedbatelně (tab. 4. a 5.). Barevný odstup obarvených roztoků od červených a bílých částic byl dostatečný,

což umožňovalo relativně snadný postup při vyhodnocení a získání objektů zájmu ve snímku pomocí prahování.

Obarvená čela roztoků při vizualizaci se „nerozpíjely“, tvořily většinou ostré rozhraní a tím bylo umožněno získat relativně přesné hodnoty mezerových rychlostí resp. rychlosti v kanálcích u všech modelových systémů. Při nízkých rychlostech, pro systémy s červenými částicemi, se barvivo „ztrácelo“ ve shlucích částic a nebylo možno docílit takové přesnosti vyhodnocení jako při rychlosti vyšší, kdy byly částice relativně osamocenější. U bílých částic byl barevný odstup ve všech měřeních dostačující.

Pro obarvený vodný roztok Emkaroxu se čelo obarveného roztoku pohybovalo relativně rovnoměrně s konstantní rychlostí v celém průřezu kolony. U Natrosol byly patrné rozdíly rychlostí v průřezu kolony, kdy se barvivo nedostává až ke stěnám kolony a vznikající a zanikající kanály kapalinu urychlovaly resp. zpomalovaly. Rychlost čela obarvené kapaliny proudící v daných kanálcích u systémů tvořených roztokem Praestolu byla v celé koloně přibližně stejná. Rozdílné rychlosti v kanálcích byly dány nejspíše různou šířkou vzniklých kanálů.

Při analýze obrazu, která sloužila k získání dat k hodnocení fluidace pomocí zónového modelu a odzkoušení pluginu *Distance*, byl pro jednotlivé modelové systémy zvolen vždy postup, který dával nejvěrohodnější obraz sledovaných skutečností. Nejednotný způsob vyhodnocení byl dán různou sytostí a barevností použitých částic a obarvených modelových systémů. To byl taky jeden z důvodů časové náročnosti vyhodnocení naměřených a zaznamenaných dat. Při nízkých rychlostech se u prahovaného obrazu špatně určovaly místa, kde obarvená kapalina ve vrstvě ještě tvoří kanál a kde se barvivo dostalo již „difuzí“. Toto může mít vliv na velikost odchylek mezi experimentálně získanou rychlostí a rychlostí určenou ze zónového modelu u jednotlivých modelových systémů.

Pro systémy s modelovou kapalinou Natrosol byly relativní odchylky mezi naměřenou a vypočtenou rychlostí v kanálcích zónového modelu v rozmezí -0,59% až -30,64%, u systémů s modelovou kapalinou Praestolu byly v rozmezí 3,59% až -11,02%. Odchylky naměřených a vypočtených hodnot mohou být způsobeny subjektivním prahováním kanálků v jednotlivých obrázcích systémů. Pravděpodobná největší chyba je způsobena nezapočítáním plochy kanálků, které nelze z důvodů uspořádání scény postihnout.

U všech systémů, na které byl aplikován zónový model, je poměr objemových průtoků f až na výjimky nad 90% bez závislosti na bezrozměrné rychlosti u_B , a to v celém proměřeném rozmezí u_B

pro jednotlivé systémy. Pro systémy NA_M_MM a NA_S_MM je ε_1 konstantní v rozmezí $u_B < 0,2 - 0,5 >$ a pro NA_V_MM roste s rostoucí bezrozměrnou rychlostí v celém proměřeném rozsahu u_B . Pro systémy PR_M_MM a PR_S_MM hodnota ε_1 mírně narůstá s rostoucí hodnotou u_B v rozmezí $< 0,2 - 0,7 >$ a pro systém PR_V_MM je patrný nárůst ε_1 v rozmezí $u_B < 0,04 - 0,27 >$. Poměr u_{ch}/u má až na systémy PR_M_MM a PR_V_MM klesající trend s rostoucí hodnotou u_B v proměřených rozmezích u_B .

6.4 Relativní vzdálenost částic ve vrstvě

Pro vybrané systémy byl odzkoušen plugin *Distance*, který byl primárně vytvořen pro hodnocení relativních vzdáleností částic, které ve fluidní vrstvě tvoří pouze jednu vrstvu částic (nepřekrývající se). Toto kritérium nebylo v mém případě splněno pro nízké rychlosti, při kterých probíhaly některé fluidační experimenty, proto je zde uvedeno jen porovnání systému EM, NA, PR při relativně vysokých rychlostech, kdy částice přestávaly tvořit shluky a vzájemně byly oddělené. Pro Praestol byla odseparována a hodnocena pouze vrstva ve které se tvořily kánály.

Pro newtonský roztok Emkaroxu je patrné homogenní rozložení relativních vzdáleností (v tomto případě vzdálenost mezi částicemi dělená velikostí částice) ve všech směrech.

Pro mírně pseudoplastický a elastický roztok Natrosolu je z grafu patrná větší nehomogenita, která je rovnoměrně rozšířená ve všech směrech. Je to z důvodu vznikajících a zanikajících krátkých kanálků v celé fluidní vrstvě.

Silně pseudoplastický a elastický roztok Praestolu má nehomogenní rozložení relativních vzdáleností, ale je taky patrné „zploštění“ polárního grafu ze stran, způsobené vznikem stálých vertikálních kanálů přes celou fluidní vrstvu.

7. Závěr

Předložená diplomová práce se zabývá experimentálním studiem struktury a expanze vrstev kulových částic. Vrstva částic byla fluidována newtonskými (vodný roztok Emkaroxu) a neneutronskými (vodné roztoky polymeru Natrosolu a Praestolu) kapalinami v „dvourozměrné“ obdélníkové koloně s částicemi tvořící víc než jednu vrstvu částic za sebou.

Byla upravena metodika vizualizace toku kapalin fluidní vrstvou pomocí metody alternativního čerpání obarvené modelové kapaliny vstupující do fluidační kolony. Na dostupném zařízení pro vizualizaci toku kapaliny fluidní vrstvou částic byl navržen nový typ distributoru obarvené modelové kapaliny.

Celkem bylo proměřeno 9 systémů částice – kapalina při různých mimovrstvových rychlostech. Průběhy expanzí fluidní vrstvy modelových systémů a vizualizace toku kapaliny fluidní vrstvou byly zaznamenány pomocí digitální videokamery. Vybrané videosekvence fluidace vrstev kulových částic byly vyhodnoceny pomocí metod analýzy obrazu. Pro zpracování videozáznamu a analýzu obrazu byly použity volně dostupné programy VirtualDub a ImageJ s příslušnými pluginy. Prokázalo se, že tyto aplikace jsou dostačující pro účely této práce, tj. vyhodnocení a zpracování obrazových dat.

Byly ověřeny a potvrzeny výsledky z předchozích prací, že se vzrůstajícími neneutronskými anomáliemi přechází v plouživé oblasti toku homogenní fluidace na agregativní fluidaci a expanze fluidní vrstvy se snižuje s rostoucím stupněm pseudoplasticity a elasticity použitých modelových kapalin.

V rámci této práce byl pro popis agregativní expanze při fluidaci neneutronskými kapalinami použit zónový model. Byl vypracován postup pro stanovení parametrů zónového modelu pomocí veličin získaných z analýzy obrazu snímků pořízených z videozáznamu vizualizace toku kapaliny fluidní vrstvou částic.

Pro newtonský 33% vodný roztok Emkaroxu parametry zónového modelu nebyly stanoveny, protože se jednalo v tomto případě o přibližně homogenní fluidaci. Pro modelové systémy tvořené tímto newtonským roztokem byly stanoveny a porovnány mezerové rychlosti kapaliny ve fluidní vrstvě získané výpočtem s experimentálně zjištěnými hodnotami (nejvyšší chyba -17,5%).

Jednoduchý zónový model pro agregativní fluidaci byl aplikován na modelové systémy s roztoky polymerů Natrosolu a Praestolu. Maximální relativní odchylka mezi experimentální a vypočtenou hodnotou rychlosti v kanálcích ze zónového modelu byla pro modelové systémy s roztokem Natrosol -30,6% a Praestol -11,0%.

Pro modelové systémy bylo odzkoušeno také hodnocení homogenity fluidní vrstvy pomocí vytvořeného pluginu *Distance*. Z hodnocení je patrné, že newtonský modelový systém má úzké rozložení vzdáleností mezi částicemi ve všech směrech a s rostoucí neneutronskou anomálií modelových tekutin toto rozložení narůstá a soustředí se spíše ve vertikální ose (ve směrech vzniku kanálků).

V dalším výzkumu fluidace newtonských a neneutronských kapalin lze doporučit pro podrobnější studium uvedených jevů a ověření vhodnosti nebo

rozšíření platnosti zónového modelu a použití pluginu *Distance* proměřením většího množství různých systémů pevná částice – kapalina, rozpracovat metodiku vizualizace toku kapalin fluidní vrstvou s využitím fotochromatických barviv nebo pomocí elektrolýzy. Vypracovat kritéria pro postup vyhodnocení při zpracování obrazu, a tím odstranit subjektivnost vyhodnocení. Snížit časovou náročnost zpracování videosekvencí a statických snímků pomocí metod analýzy obrazu vytvořením vhodných maker (pluginů) v použitých softwarových produktech.

8. Literatura

- [1] Roy S., Kemoun A., Al-Dahhan M. H., Dudukovic M. P., *AIECh Journal* 51, 802 (2005).
- [2] Miury H., Kawase Y., *Powder technology* 97, 124 (1998).
- [3] Limtrakul S., Chen J., Ramachandran P. A., Dudukovic M. P., *Chemical Engineering Science* 60, 1889 (2005).
- [4] Šesták J., Rieger Fr.: *Přenos hybnosti, tepla a hmoty*, ČVUT, Praha, 2004.
- [5] Bird R. B., Armstrong R. C., Messenger O.: *Dynamic of polymeric liquids*, Vol. I. a Vol. II. New York, 1977.
- [6] Tanner R. I.: *Engineering CHISA*, Clarenton Press Oxford, 1985.
- [7] Zhu H., Kim Y. D., Kee D. De., *J. non-Newtonian fluid mech.* 129, 177 (2005).
- [8] Davidson J. E., Harrison D., *Fluidization*, Academic Press London and New York, 1971.
- [9] Gibilaro L.G., *Fluidization-Dynamics*, Butterworth and Heinemann, Oxford, 2001.
- [10] Beránek J., Sokol D.: *Fluidní technika*, SNTL, 1961.
- [11] Davidson J. E., Harrison D.: *Fluidization*, Academic press London and New York.
- [12] Novák V., Rieger F., Vavro K.: *Hydraulické pochody v chemickém a potravinářském průmyslu*, SNTL, 1989.
- [13] Goroško V. D., Rozenbaum R. B., Todes O. M.: *Izv. vuzov, Neft I gaz* 1, 125 (1958).
- [14] Richardson J. F., Zaki W. N.: *Trans. Inst. Chem Eng.* 32, 35 (1994)
- [15] Beránek J., Sokol D., Winterstein G.: *Wirberschichttechnik* Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Lipsko 1964.
- [16] Foscolo P. U., Gibilaro L. G., Waldram S. P., *Chem. Eng. Sci.* 38, 1251 (1983).
- [17] Machač I., Pilař A., *Chem. Prům.* 2, (1971).
- [18] Hartman M., Coughlin R. W., *Coll. Czech. Chem. Comm.* 58, 1213 (1993).
- [19] Lippens B.C., Mulder J., *Powder Technology* 75, 67 (1993).
- [20] Flemmer R. L. C., Pickett J., Clark N. N., *Powder Technology* 77, 123 (1993).
- [21] Hartman M., Coughlin R. W.: *Collection of the Czechoslovakia Chemical Communications* 58, 1213 (1993).
- [22] Sabiri N. E., Comiti J., Brahimí M., *Proceedings of the Fifth World Congress of Chemical Engeneering*, San Diego, California 6, 225 (1996).
- [23] Cicerón D., Sabiri N. E., Comiti J., *13th Inter. Cong. of Chem. and Proc. Eng.* 1998.
- [24] Cicerón D., *Thèse de doctorat, de l'Université de Nantes* 2001.
- [25] Kawase Y., Ulbrecht J.: *Chemical Engineering Science* 36, 1193 (1981).
- [26] Kawase Y., Ulbrecht J., *Chem. Eng. Sci.* 36, 1193 (1981).
- [27] Yu Y. H., Wen C. Y., Bailie R. C., *Can. J. Chem. Eng.* 46, 149 (1968).
- [28] Miura H., Takahashi T., Ichikawa J., Kawase Y., *Powder Technology* 117, 239 (2001).
- [29] Machač I., Balcar M., Lecjaks Z.: *Chemical Engineering Science* 41, 591 (1986).
- [30] Balcar M.: *Kandidátská disertační práce, VŠCHT Pardubice*, 1984.
- [31] Ulbrichová I.: *Kandidátská disertační práce, VŠCHT Pardubice*, 1994.
- [32] Novotný Z.: *Diplomová práce, VŠCHT Pardubice*, 1993.
- [33] Machač I., Lecjaks Z.: *Chemical Engineering Science* 50, 143 (1995).
- [34] Machač I., Mikulášek P., Ulbrichová I.: *Chemical Engineering Science* 48, 2109 (1993).
- [35] Machač I., Šiška B., Lecjaks Z., Bena J.: *Chemical Engineering Science* 52, 3409 (1997).
- [36] Wu W. Y., Saxena S. C., TrojnarSKI R. L., Morfia M. V.: *Energy* 21, 825 (1996).
- [37] Brokl P.: *Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI*, 2001.
- [38] Kumar S., Upadhyay S. N., *Ind. Eng. Chem. Fundam.* 20, 186 (1981).
- [39] Machač I., Bena J., Šiška B.: *13th International Congres of Chemical and Processing Engineering CHISA*, Praha, 1998.
- [40] Todes O., Citovic O. B.: *Aparaty s kipjašcím zernistým slojem*, Chimija Lenningrad, 1981.
- [41] Protodjakov I. O., Cesnokov J. G.: *Gidromechanika psevdožizennogo sloja*, Chimija Lenningrad, 1982.
- [42] Mikulášek P.: *Kandidátská disertacní práce, VŠCHT Pardubice*, 1991.

- [43] Teichman R., Brokl P., Šiška B., Machac I.: 48th National Conference CHISA, Srní, 2001.
- [44] Radon P.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 1995.
- [45] Novotná M.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 1993.
- [46] Brokl P.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 2001.
- [47] Bendová H.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 2002.
- [48] Přichystal P.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 2004.
- [49] Teichman R.: Disertační práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 2004.
- [50] Šiška B., Doleček P., Bendová H., Machač I.: 15th International Congress of Chemical and Processing Engineering CHISA, Praha, 2004.
- [51] Smits A. J., Lim T. T.: Flow Visualization Techniques an Examples, Imperial College Press, 2000.
- [52] Kantzas A.: Chemical Engineering Science 51, 1979 (1996).
- [53] Roy S., Kemoun A., Al-Dahhan M. H., Dudukovic M. P.: AIChE Journal 51, 802 (2005).
- [54] Kurada S., Rankin G.W., Sridhar K.: Optics and Lasers in Engineering 20, 177 (1994).
- [55] Kawaji M.: Nuclear Engineering and Design 184, 379 (1998).
- [56] Simon M.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 2005.
- [57] Internetové stránky o Adobe Premiere Pro – <http://www.amsoft.cz/produkty/adobe/premiere/pdf/DigitalVideoCZ.pdf>
- [58] Závodný T.: Bakalářská práce, Masarykova Univerzita, Fakulta Informatiky, Brno, 2002 – <http://www.fi.muni.cz/%7Expavlov/xml/examples/bc3/bc3.html#d0e402>
- [59] Šonka M., Hlaváč V., Boyle R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, PWS, 1998 – <http://www.icaen.uiowa.edu/~dip/LECTURE/lecture.html>
- [60] Chhabra R. P., Uhlherr P. H.: Can. J. Chem. Eng. 59, 771, 1981
- [61] Rasband, W.S., ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://rsb.info.nih.gov/ij/>, 1997 – 2006.

9. Příloha

označení	d [mm]	σ [mm]	+/- Δd [mm]	ρ [kg.m ⁻³]
M	1,460	0,008	0,002	2535
S	2,010	0,016	0,006	2617
V	2,423	0,029	0,003	2645

Tab. 1. Charakteristika částic

označení	kapalina	sloučenina	výrobce	konc. [hm.%]	ρ [kg.m ⁻³]
EM	Emkarox	polyoxyalkylen glykol	Uniqema	33	1039
NA	Natrosol	hydroxyethylcelulóza	Hercules NV	0,6	1016
PR	Praestol	polyakrylamid	Chemische Fabrik Stockhausen GmbH	0,4	1000

Tab. 2. Charakteristika kapalin

kapalina	barvivo	označení	konc. [hm.%]
Emkarox	methylenová modř	MM	0,01
Natrosol			0,01
Praestol			0,005

Tab. 3. Charakteristika barviva

název	K [Pa.s ⁿ]	n [-]	$\Delta\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]
EM_V+S	0,306	1,000	0,1 – 1000
EM_V+S_MM	0,287	1,000	0,1 – 1000
EM_M	0,276	1,000	0,1 – 1000
EM_M_MM	0,267	1,000	0,1 – 1000

Tab. 4. Parametry mocninového modelu

název	γ_0 [Pa.s]	γ_∞ [Pa.s]	λ [s]	m [-]	$\Delta\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]
PR	2,144	0,000	9,278	0,429	0,1 – 1000
PR_MM	2,425	0,000	12,765	0,441	0,1 – 1000
NA	0,503	0,000	0,177	0,530	0,1 – 1000
NA_MM	0,486	0,000	0,167	0,528	0,1 – 1000

Tab. 5. Parametry Carreauova modelu

název	u_t [mm.s ⁻¹]	F_w	$u_{t,\infty}$ [mm.s ⁻¹]	Re_t
EM_M	5,52	0,9233	5,98	$2,966 \cdot 10^{-2}$
EM_S	9,88	0,8945	11,05	$7,545 \cdot 10^{-2}$
EM_V	14,94	0,8730	17,11	$1,409 \cdot 10^{-1}$

Tab. 6. Pádová rychlost v newtonské kapalině

název	u_t [mm.s ⁻¹]	F_w	$u_{t,\infty}$ [mm.s ⁻¹]	$Re_{t,c}$
NA_M	3,29	0,9442	3,49	$1,155 \cdot 10^{-2}$
NA_S	6,41	0,9266	6,92	$3,404 \cdot 10^{-2}$
NA_V	9,65	0,9140	10,56	$6,680 \cdot 10^{-2}$
PR_M	3,25	0,9588	3,39	$1,931 \cdot 10^{-2}$
PR_S	7,33	0,9464	7,74	$8,033 \cdot 10^{-2}$
PR_V	12,72	0,9379	13,57	$2,090 \cdot 10^{-2}$

Tab. 7. Pádová rychlost v neneutonských kapalinách

u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u_B	ε	Re
0,00	10,5	0,000	0,437	$0,00 \cdot 10^0$
0,35	12,0	0,059	0,507	$1,95 \cdot 10^{-3}$
1,00	17,8	0,167	0,668	$5,50 \cdot 10^{-3}$
1,20	20,3	0,201	0,709	$6,60 \cdot 10^{-3}$
1,48	22,5	0,248	0,737	$8,14 \cdot 10^{-3}$
1,75	25,1	0,293	0,764	$9,62 \cdot 10^{-3}$
1,99	27,7	0,333	0,786	$1,09 \cdot 10^{-2}$
2,30	30,8	0,385	0,808	$1,26 \cdot 10^{-2}$
2,63	34,4	0,440	0,828	$1,45 \cdot 10^{-2}$
2,89	38,5	0,483	0,846	$1,59 \cdot 10^{-2}$
3,20	43,0	0,535	0,862	$1,76 \cdot 10^{-2}$
3,50	49,5	0,585	0,880	$1,92 \cdot 10^{-2}$
3,70	55,0	0,619	0,892	$2,03 \cdot 10^{-2}$

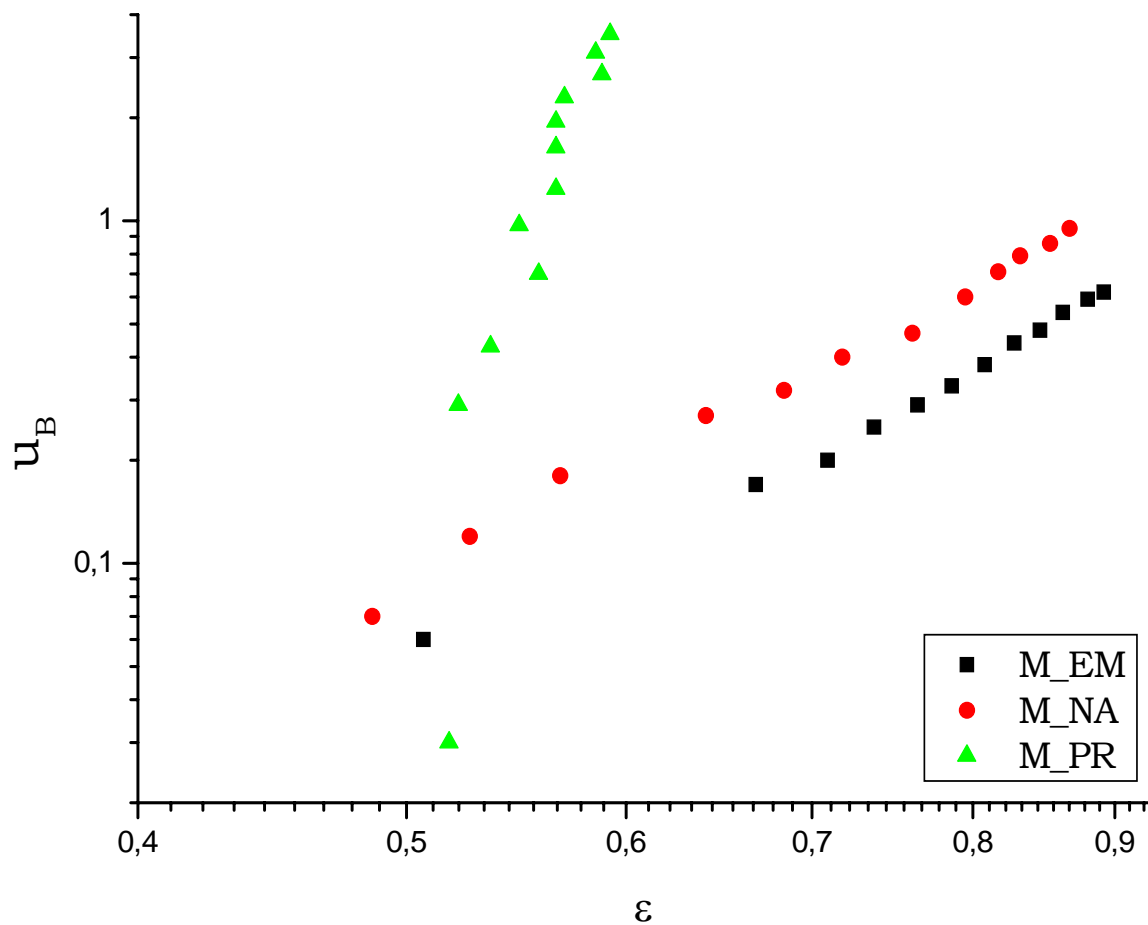
Tab. 8. Experimentální data pro systém EM_M

u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _C
0,00	10,5	0,000	0,437	0,00.10 ⁰
0,23	11,5	0,066	0,486	7,61.10 ⁻⁴
0,43	12,5	0,123	0,527	1,42.10 ⁻³
0,65	13,7	0,185	0,568	2,14.10 ⁻³
0,93	16,5	0,267	0,641	3,08.10 ⁻³
1,13	18,7	0,324	0,684	3,74.10 ⁻³
1,39	21,0	0,398	0,718	4,60.10 ⁻³
1,65	24,8	0,473	0,761	5,46.10 ⁻³
2,10	28,8	0,602	0,795	6,95.10 ⁻³
2,46	32,3	0,705	0,817	8,14.10 ⁻³
2,75	35,3	0,788	0,832	9,10.10 ⁻³
3,01	40,2	0,863	0,853	9,96.10 ⁻³
3,30	44,5	0,946	0,867	1,09.10 ⁻²

Tab. 9. Experimentální data pro systém NA_M

u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _C
0,00	9,5	0,000	0,497	0,00.10 ⁰
0,40	9,9	0,029	0,518	6,16.10 ⁻³
0,75	10,0	0,055	0,522	1,16.10 ⁻²
1,10	10,3	0,081	0,536	1,69.10 ⁻²
1,42	10,8	0,105	0,558	2,19.10 ⁻²
1,75	10,6	0,129	0,549	2,70.10 ⁻²
1,90	11,0	0,140	0,566	2,93.10 ⁻²
2,40	11,0	0,177	0,566	3,70.10 ⁻²
3,20	11,0	0,236	0,566	4,93.10 ⁻²
3,90	11,1	0,287	0,570	6,01.10 ⁻²
6,80	11,6	0,501	0,588	1,05.10 ⁻¹
7,30	11,5	0,538	0,585	1,12.10 ⁻¹
9,85	11,7	0,726	0,592	1,52.10 ⁻¹

Tab. 10. Experimentální data pro systém PR_M



Graf 1. Expanzní křivka částic M

u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re
0,00	12,5	0,000	0,622	0,00.10 ⁰
0,71	11,5	0,064	0,589	4,85.10 ⁻³
1,01	13,5	0,091	0,650	6,90.10 ⁻³
1,35	15,0	0,122	0,685	9,22.10 ⁻³
1,70	17,0	0,154	0,722	1,16.10 ⁻²
2,01	19,6	0,182	0,759	1,37.10 ⁻²
2,32	21,4	0,210	0,779	1,58.10 ⁻²
2,58	23,6	0,234	0,800	1,76.10 ⁻²
2,86	26,3	0,259	0,820	1,95.10 ⁻²
3,10	28,7	0,281	0,835	2,12.10 ⁻²
3,56	33,3	0,322	0,858	2,43.10 ⁻²
3,77	36,5	0,341	0,871	2,58.10 ⁻²
4,03	39,8	0,365	0,881	2,75.10 ⁻²
4,25	44,5	0,385	0,894	2,90.10 ⁻²
4,46	48,2	0,404	0,902	3,05.10 ⁻²
4,82	58,0	0,436	0,919	3,29.10 ⁻²

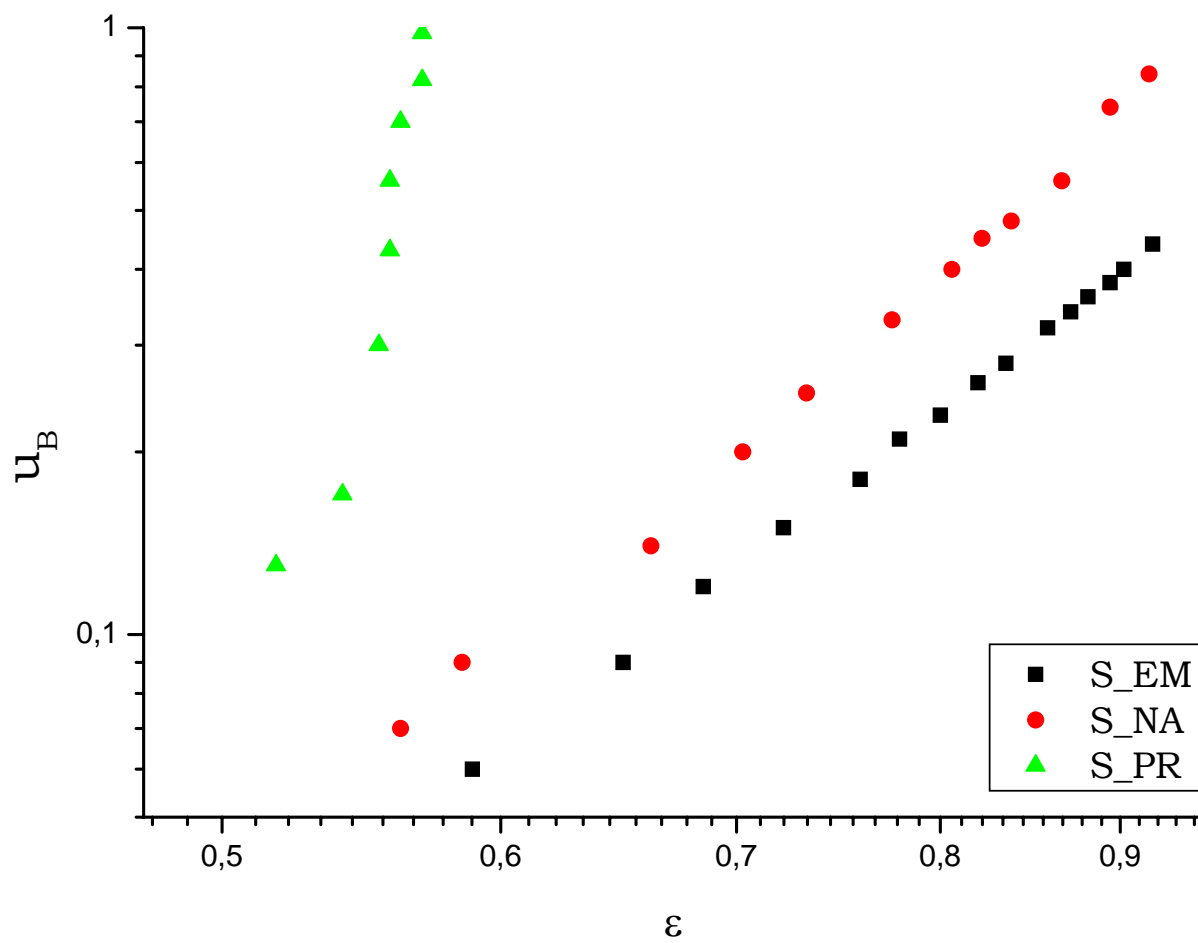
Tab. 11. Experimentální data pro systém EM_S

u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _C
0,00	9,0	0,000	0,475	0,00.10 ⁰
0,47	10,8	0,067	0,562	2,29.10 ⁻³
0,63	11,4	0,090	0,585	3,08.10 ⁻³
0,98	14,0	0,141	0,662	4,81.10 ⁻³
1,35	15,9	0,195	0,703	6,64.10 ⁻³
1,74	17,7	0,252	0,733	8,56.10 ⁻³
2,30	21,0	0,333	0,775	1,13.10 ⁻²
2,75	24,3	0,398	0,806	1,35.10 ⁻²
3,11	26,5	0,450	0,822	1,53.10 ⁻²
3,35	29,2	0,484	0,838	1,65.10 ⁻²
3,90	35,3	0,564	0,866	1,92.10 ⁻²
5,14	44,5	0,743	0,894	2,53.10 ⁻²
5,82	57,0	0,841	0,917	2,86.10 ⁻²

Tab. 12. Experimentální data pro systém NA_S

u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _c
0,00	9,0	0,000	0,475	0,00.10 ⁰
1,00	9,8	0,129	0,518	1,04.10 ⁻²
1,30	10,3	0,168	0,541	1,35.10 ⁻²
2,30	10,6	0,297	0,554	2,39.10 ⁻²
3,35	10,7	0,433	0,558	3,48.10 ⁻²
4,30	10,7	0,556	0,558	4,46.10 ⁻²
5,40	10,8	0,698	0,562	5,60.10 ⁻²
6,33	11,0	0,818	0,570	6,57.10 ⁻²
7,55	11,0	0,975	0,570	7,84.10 ⁻²

Tab. 13. Experimentální data pro systém PR_S



Graf 2. Expanzní křivka částic S

u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re
0,00	10,5	0,000	0,437	0,00.10 ⁰
0,35	12,0	0,059	0,507	1,95.10 ⁻³
1,00	17,8	0,167	0,668	5,50.10 ⁻³
1,20	20,3	0,201	0,709	6,60.10 ⁻³
1,48	22,5	0,248	0,737	8,14.10 ⁻³
1,75	25,1	0,293	0,764	9,62.10 ⁻³
1,99	27,7	0,333	0,786	1,09.10 ⁻²
2,30	30,8	0,385	0,808	1,26.10 ⁻²
2,63	34,4	0,440	0,828	1,45.10 ⁻²
2,89	38,5	0,483	0,846	1,59.10 ⁻²
3,20	43,0	0,535	0,862	1,76.10 ⁻²
3,50	49,5	0,585	0,880	1,92.10 ⁻²
3,70	55,0	0,619	0,892	2,03.10 ⁻²

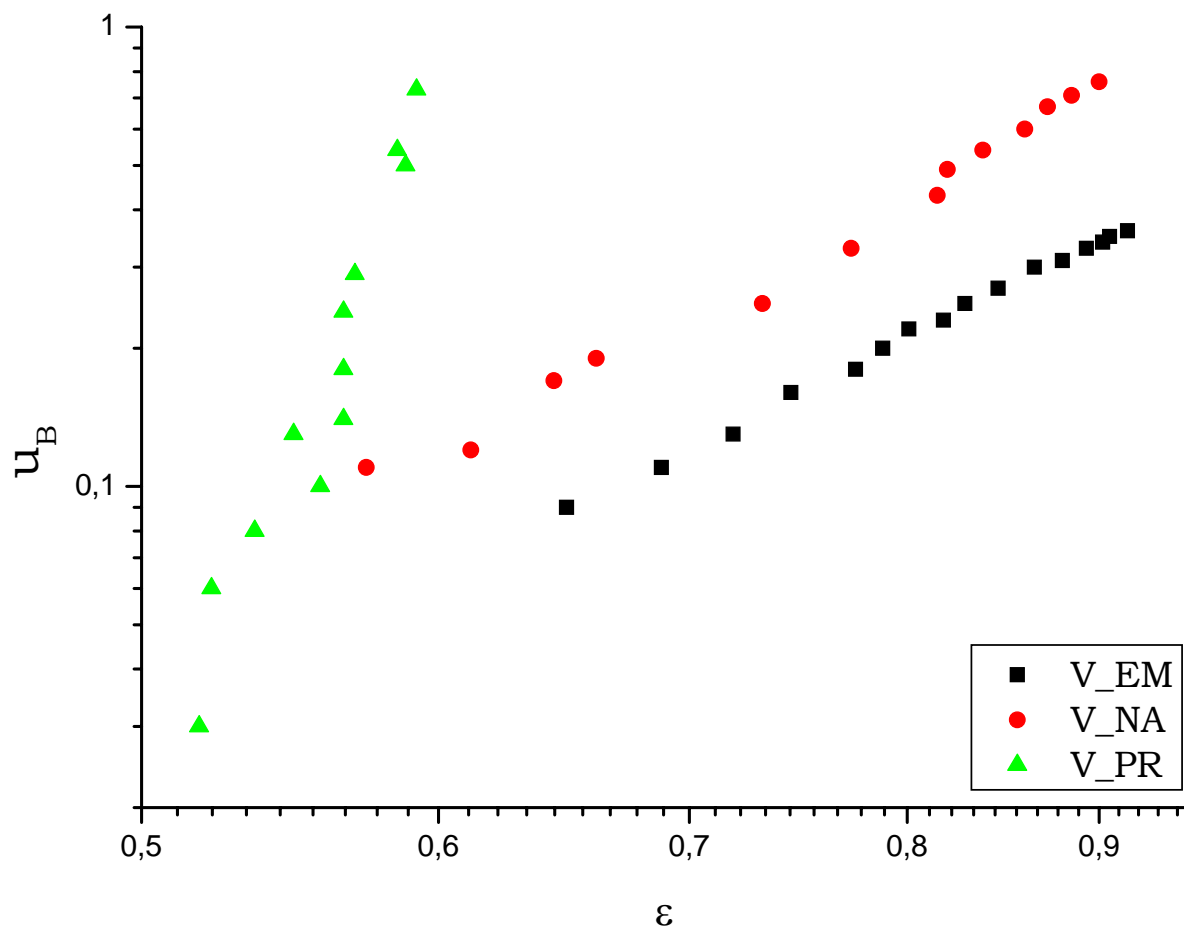
Tab. 14. Experimentální data pro systém EM_V

u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _C
0,00	9,5	0,000	0,497	0,00.10 ⁰
1,15	11,2	0,109	0,574	7,27.10 ⁻³
1,31	12,3	0,124	0,612	8,29.10 ⁻³
1,80	13,4	0,170	0,644	1,14.10 ⁻²
2,02	14,1	0,191	0,661	1,28.10 ⁻²
2,62	17,8	0,248	0,732	1,66.10 ⁻²
3,45	21,0	0,327	0,773	2,18.10 ⁻²
4,58	25,8	0,434	0,815	2,90.10 ⁻²
5,18	26,5	0,490	0,820	3,28.10 ⁻²
5,75	29,5	0,544	0,838	3,64.10 ⁻²
6,38	34,0	0,604	0,860	4,04.10 ⁻²
7,08	37,3	0,670	0,872	4,48.10 ⁻²
7,45	41,5	0,705	0,885	4,71.10 ⁻²
8,05	48,0	0,762	0,900	5,09.10 ⁻²

Tab. 15. Experimentální data pro systém NA_V

u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Rec
0,00	9,5	0,00	0,497	0,00.10 ⁰
0,40	9,9	0,03	0,518	6,16.10 ⁻³
0,75	10,0	0,06	0,522	1,16.10 ⁻²
1,10	10,3	0,08	0,536	1,69.10 ⁻²
1,42	10,8	0,10	0,558	2,19.10 ⁻²
1,75	10,6	0,13	0,549	2,70.10 ⁻²
1,90	11,0	0,14	0,566	2,93.10 ⁻²
2,40	11,0	0,18	0,566	3,70.10 ⁻²
3,20	11,0	0,24	0,566	4,93.10 ⁻²
3,90	11,1	0,29	0,570	6,01.10 ⁻²
6,80	11,6	0,50	0,588	1,05.10 ⁻¹
7,30	11,5	0,54	0,585	1,12.10 ⁻¹
9,85	11,7	0,73	0,592	1,52.10 ⁻¹

Tab. 16. Experimentální data pro systém PR_V



Graf 3. Expanzní křivka částic V

název	u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re
EM_M_1_MM	0,43	13,2	0,072	0,552	2,364.10 ⁻³
EM_M_3a_MM	2,76	35,5	0,462	0,833	1,517.10 ⁻²
EM_M_3b_MM					
EM_M_4a_MM	3,68	69	0,615	0,914	2,023.10 ⁻²
EM_M_4b_MM					

Tab. 17. Experimentální data pro systém EM_M_MM

název	u _{ε,vyp} [mm.s ⁻¹]	u _{ε,exp} [mm.s ⁻¹]	Δ[mm.s ⁻¹]	δ
EM_M_1_MM	0,779	0,812	0,033	4,20%
EM_M_3a_MM	3,312	3,574	0,262	7,90%
EM_M_3b_MM		3,211	-0,101	-3,04%
EM_M_4a_MM	4,025	4,155	0,130	3,23%
EM_M_4b_MM		3,955	-0,070	-1,73%

Tab. 18. Porovnání naměřených a vypočtených rychlostí systému EM_M_MM

název	u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re
EM_S_1_MM	0,91	12,5	0,082	0,622	6,216.10 ⁻³
EM_S_2_MM	1,80	18,5	0,163	0,745	1,229.10 ⁻²
EM_S_3_MM	3,12	26,2	0,282	0,820	2,131.10 ⁻²
EM_S_4a_MM	4,25	42	0,385	0,887	2,903.10 ⁻²
EM_S_4b_MM					
EM_S_5a_MM	5,21	71	0,472	0,933	3,559.10 ⁻²
EM_S_5b_MM					

Tab. 19. Experimentální data pro systém EM_S_MM

název	u _{ε,vyp} [mm.s ⁻¹]	u _{ε,exp} [mm.s ⁻¹]	Δ[mm.s ⁻¹]	δ
EM_S_1_MM	1,463	1,408	-0,056	-3,80%
EM_S_2_MM	2,418	1,994	-0,423	-17,50%
EM_S_3_MM	3,807	3,699	-0,108	-2,83%
EM_S_4a_MM	4,789	4,708	-0,081	-1,68%
EM_S_4b_MM		4,551	-0,238	-4,97%
EM_S_5a_MM	5,582	5,656	0,075	1,34%
EM_S_5b_MM		5,381	-0,200	-3,59%

Tab. 20. Porovnání naměřených a vypočtených rychlostí systému EM_S_MM

název	u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re
EM_V_2_MM	1,66	14,70	0,097	0,675	1,367.10 ⁻²
EM_V_4_MM	2,68	19,50	0,157	0,755	2,207.10 ⁻²
EM_V_5_MM	4,19	25,50	0,245	0,813	3,450.10 ⁻²
EM_V_6a_MM	5,01	31,5	0,293	0,848	4,125.10 ⁻²
EM_V_6b_MM					
EM_V_7a_MM	6,29	55	0,368	0,913	5,179.10 ⁻²
EM_V_7b_MM					

Tab. 21. Experimentální data pro systém EM_V_MM

název	u _{e,vyp} [mm.s ⁻¹]	u _{e,exp} [mm.s ⁻¹]	Δ [mm.s ⁻¹]	δ
EM_V_2_MM	2,459	2,218	-0,241	-9,81%
EM_V_4_MM	3,549	3,028	-0,521	-14,69%
EM_V_5_MM	5,156	5,099	-0,057	-1,11%
EM_V_6a_MM	5,906	6,136	0,231	3,90%
EM_V_6b_MM		6,064	0,159	2,69%
EM_V_7a_MM	6,888	7,037	0,149	2,16%
EM_V_7b_MM		7,094	0,206	2,99%

Tab. 22. Porovnání naměřených a vypočtených rychlostí systému EM_V_MM

název	u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _c
NA_M_1_MM	0,37	11,70	0,106	0,494	1,225.10 ⁻³
NA_M_2_MM	0,88	18,30	0,252	0,677	2,913.10 ⁻³
NA_M_3_MM	1,67	24,50	0,479	0,759	5,528.10 ⁻³
NA_M_4a_MM	2,68	34,0	0,768	0,826	8,872.10 ⁻³
NA_M_4b_MM					
NA_M_5a_MM	3,73	48,0	1,069	0,877	1,235.10 ⁻²
NA_M_5b_MM					

Tab. 23. Experimentální data pro systém NA_M_MM

název	u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _c
NA_S_1_MM	1,36	13,00	0,197	0,636	6,693.10 ⁻³
NA_S_2_MM	1,60	17,30	0,231	0,727	7,874.10 ⁻³
NA_S_3_MM	2,58	22,20	0,373	0,787	1,270.10 ⁻²
NA_S_4_MM	3,35	29,50	0,484	0,840	1,649.10 ⁻²
NA_S_5a_MM	4,36	39,0	0,630	0,879	2,146.10 ⁻²
NA_S_5b_MM					

Tab. 24. Experimentální data pro systém NA_S_MM

název	u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _c
NA_V_1_MM	1,67	13,80	0,158	0,654	1,056.10 ⁻²
NA_V_2_MM	3,29	22,70	0,312	0,790	2,081.10 ⁻²
NA_V_3_MM	5,41	30,00	0,512	0,841	3,422.10 ⁻²
NA_V_4a_MM	6,29	40,5	0,596	0,882	3,978.10 ⁻²
NA_V_4b_MM					

Tab. 25. Experimentální data pro systém NA_V_MM

název	u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _c
PR_M_1_MM	0,65	11,20	0,192	0,472	3,700.10 ⁻³
PR_M_2_MM	1,42	11,60	0,419	0,490	8,084.10 ⁻³
PR_M_3_MM	2,12	11,50	0,625	0,486	1,207.10 ⁻²
PR_M_4_MM	5,73	11,90	1,689	0,503	3,262.10 ⁻²

Tab. 26. Experimentální data pro systém PR_M_MM

název	u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _c
PR_S_1_MM	5,23	10,80	0,676	0,562	5,428.10 ⁻²
PR_S_2_MM	3,11	10,60	0,402	0,554	3,228.10 ⁻²
PR_S_3_MM	1,84	10,40	0,238	0,546	1,910.10 ⁻²
PR_S_4_MM	0,86	9,70	0,111	0,513	8,925.10 ⁻³

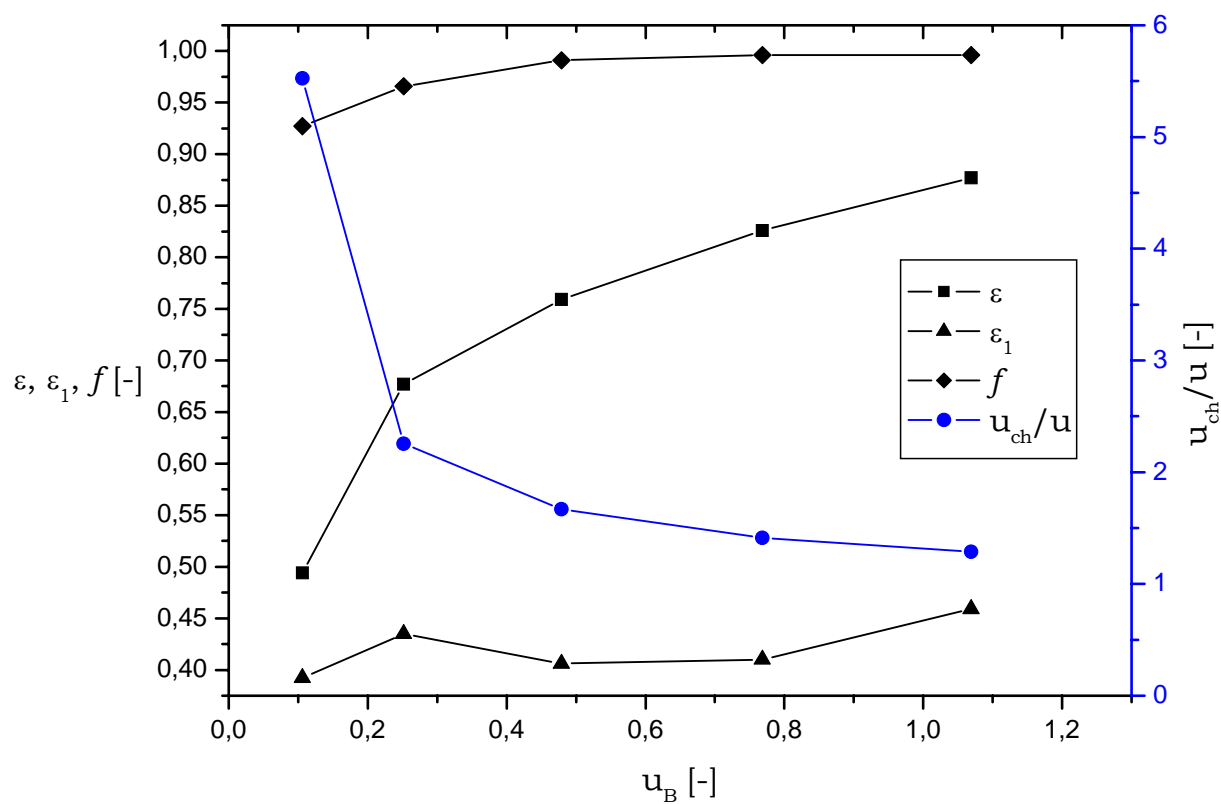
Tab. 27. Experimentální data pro systém PR_S_MM

název	u [mm.s ⁻¹]	v [cm]	u _B	ε	Re _c
PR_V_1_MM	0,49	9,00	0,036	0,469	7,550.10 ⁻³
PR_V_2_MM	1,15	9,30	0,085	0,486	1,772.10 ⁻²
PR_V_3_MM	2,02	9,90	0,149	0,518	3,113.10 ⁻²
PR_V_4_MM	3,73	11,60	0,275	0,588	5,747.10 ⁻²

Tab. 28. Experimentální data pro systém PR_V_MM

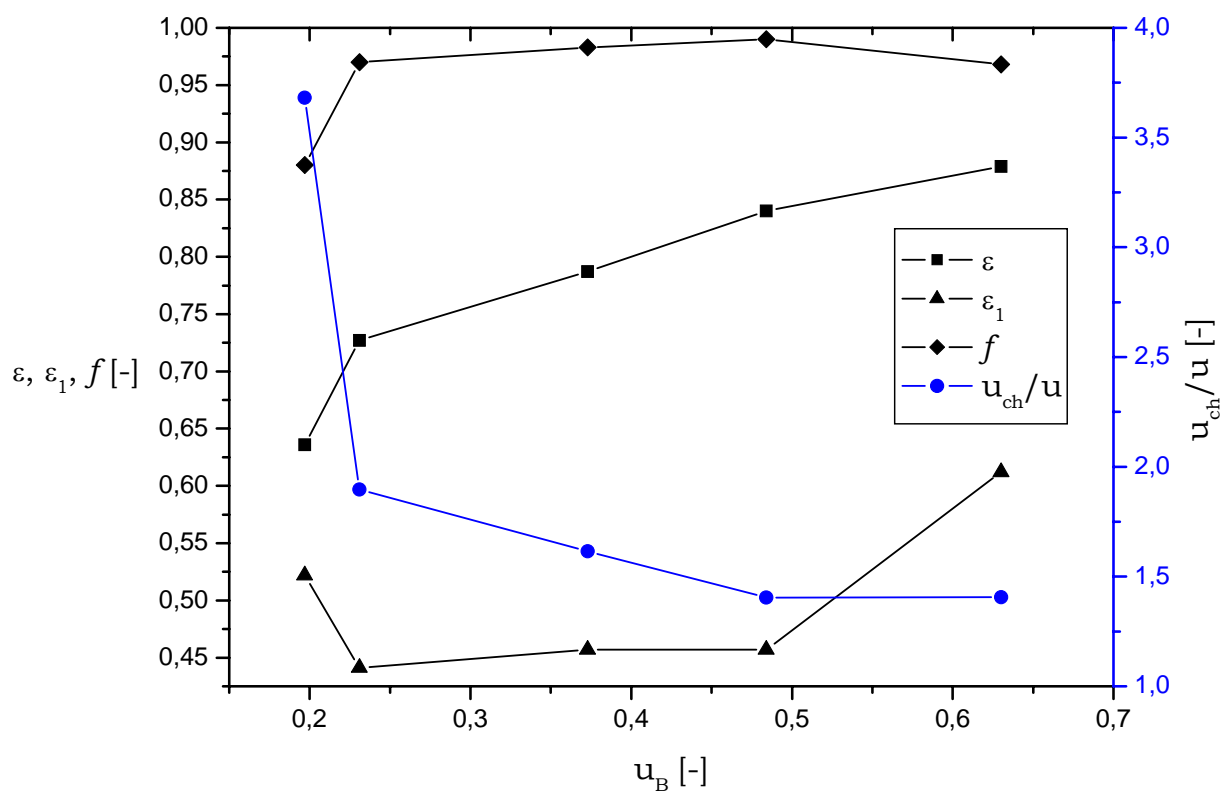
název	A_{ch} [cm ²]	A'_{ch} [cm ²]	A [cm ²]	χ	S_{ef}/S	ε_i	F_w	u_1 [mm.s ⁻¹]	f	$u_{ch,vyp}$ [mm.s ⁻¹]	$u_{ch,exp}$ [mm.s ⁻¹]	δ
NA_M_1_MM	22,48	-	94,91	0,708	0,168	0,392	0,813	0,0346	0,927	2,044	1,722	-15,74%
NA_M_2_MM	87,78	-	145,19	0,708	0,428	0,435	0,813	0,0560	0,966	1,985	1,702	-14,24%
NA_M_3_MM	-	116,35	196,09	-	0,593	0,406	0,813	0,0407	0,991	2,788	1,934	-30,64%
NA_M_4a_MM	-	72,80	103,26	-	0,705	0,410	0,813	0,0426	0,996	3,785	3,457	-8,65%
NA_M_4b_MM	-	71,89	104,43	-	0,688	0,442	0,813	0,0603	0,993	3,867	3,208	-17,05%
NA_M_5a_MM	-	81,61	105,66	-	0,772	0,459	0,813	0,0721	0,996	4,809	3,871	-19,51%
NA_M_5b_MM	-	87,91	112,83	-	0,779	0,442	0,813	0,0605	0,997	4,771	3,904	-18,17%

Tab. 29. Parametry zónového modelu pro systém NA_M_MM

Graf 4. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém NA_M_MM

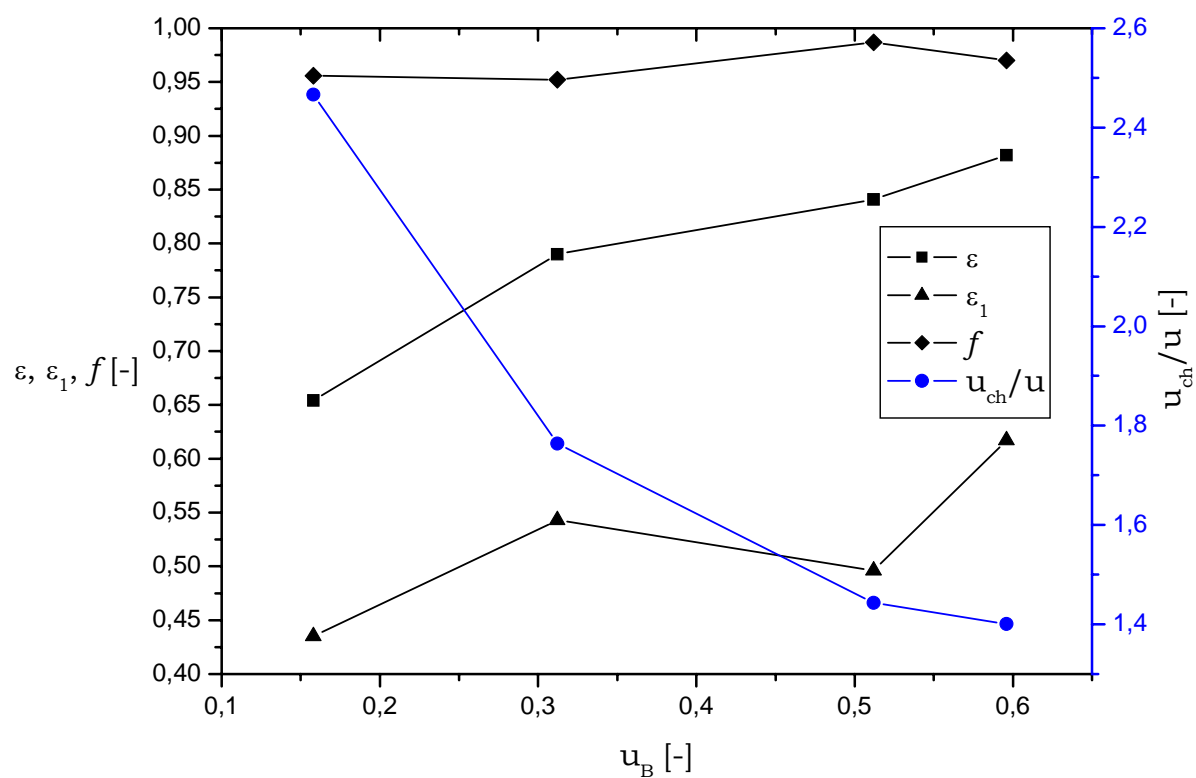
název	A_{ch} [cm ²]	A'_{ch} [cm ²]	A [cm ²]	χ	S_{ch}/S	ε_i	F_w	u_1 [mm.s ⁻¹]	f	$u_{ch,vyp}$ [mm.s ⁻¹]	$u_{ch,exp}$ [mm.s ⁻¹]	δ
NA_S_1_MM	43,25	-	108,20	0,598	0,239	0,522	0,714	0,2318	0,880	5,006	4,636	-7,39%
NA_S_2_MM	-	70,19	137,23	-	0,511	0,441	0,714	0,1043	0,970	3,036	2,279	-24,93%
NA_S_3_MM	-	108,84	178,97	-	0,608	0,457	0,714	0,1233	0,983	4,169	3,123	-25,10%
NA_S_4_MM	-	160,00	226,97	-	0,705	0,457	0,714	0,1236	0,990	4,704	4,405	-6,37%
NA_S_5a_MM	-	76,51	111,24	-	0,688	0,612	0,714	0,4889	0,968	6,134	5,846	-4,70%
NA_S_5b_MM	-	80,74	110,40	-	0,731	0,549	0,714	0,2931	0,983	5,862	5,175	-11,72%

Tab. 30. Parametry zónového modelu pro systém NA_S_MM

Graf 5. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém NA_S_MM

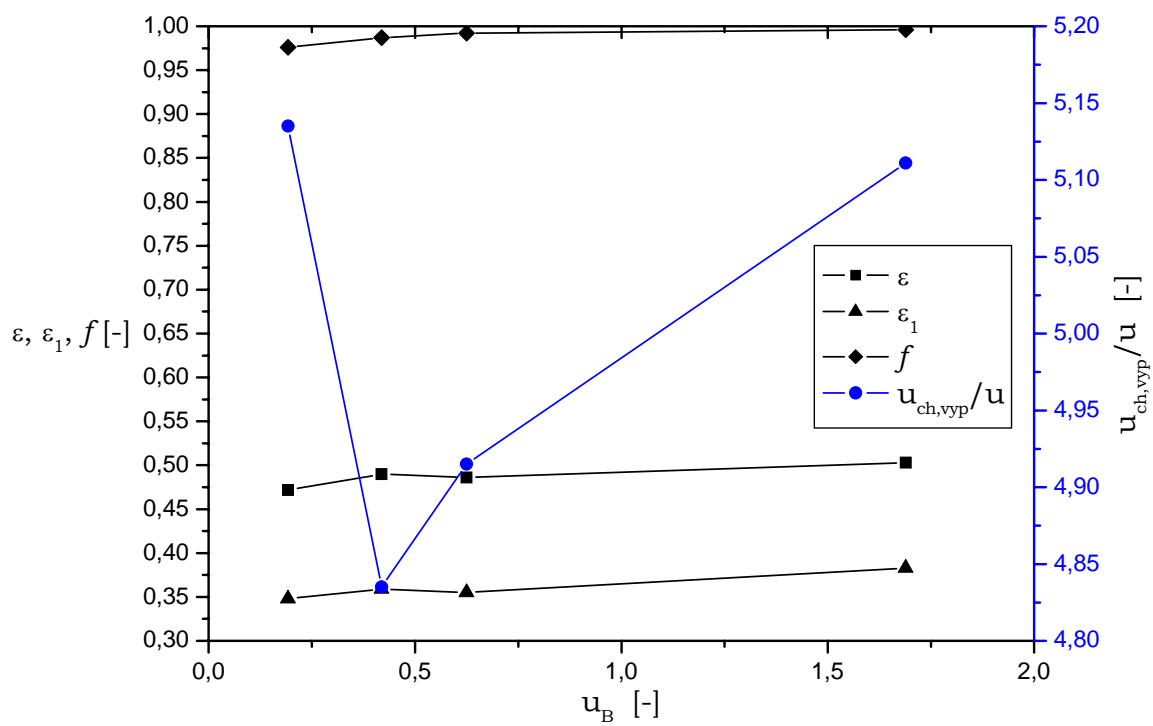
název	A_{ch} [cm ²]	A'_{ch} [cm ²]	A [cm ²]	χ	S_{ch}/S	ε_i	F_w	u_1 [mm.s ⁻¹]	f	$u_{ch,vyp}$ [mm.s ⁻¹]	$u_{ch,exp}$ [mm.s ⁻¹]	δ
NA_V_1_MM	82,51	-	109,67	0,515	0,388	0,435	0,627	0,1309	0,956	4,118	3,667	-10,95%
NA_V_2_MM	-	97,78	181,11	-	0,540	0,543	0,627	0,3722	0,952	5,804	4,600	-20,75%
NA_V_3_MM	-	75,55	110,44	-	0,684	0,496	0,627	0,2437	0,987	7,805	7,759	-0,59%
NA_V_4a_MM	-	75,34	108,83	-	0,692	0,617	0,627	0,6800	0,970	8,810	9,791	11,15%
NA_V_4b_MM	-	55,48	80,46	-	0,690	0,620	0,627	0,6978	0,969	8,835	9,607	8,74%

Tab. 31. Parametry zónového modelu pro systém NA_V_MM

Graf 6. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém NA_V_MM

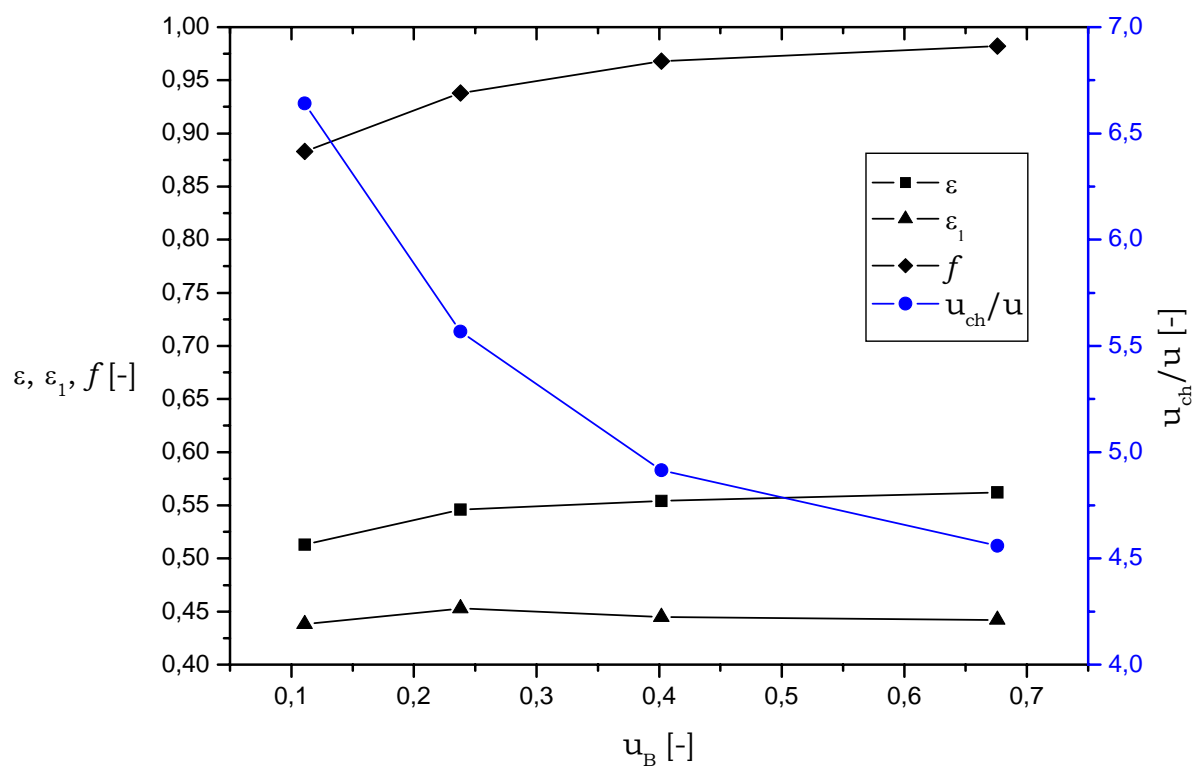
název	A_{ch} [cm ²]	A [cm ²]	χ	S_{ef}/S	ε_i	F_w	u_1 [mm.s ⁻¹]	f	q	$u_{ch,exp}$ [mm.s ⁻¹]	$u_{ch,exp}$ [mm.s ⁻¹]	δ
PR_M_1_MM	24,07	89,67	0,708	0,190	0,348	0,855	0,0200	0,976	1,050	3,338	2,970	-11,02%
PR_M_2_MM	26,81	92,92	0,708	0,204	0,359	0,855	0,0233	0,987	1,015	6,865	6,574	-4,25%
PR_M_3_MM	26,34	92,39	0,708	0,202	0,355	0,855	0,0222	0,992	1,028	10,419	9,857	-5,39%
PR_M_4_MM	26,78	97,31	0,708	0,195	0,383	0,855	0,0314	0,996	1,028	29,287	28,790	-1,70%

Tab. 32. Parametry zónového modelu pro systém PR_M_MM

Graf 7. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém PR_M_MM

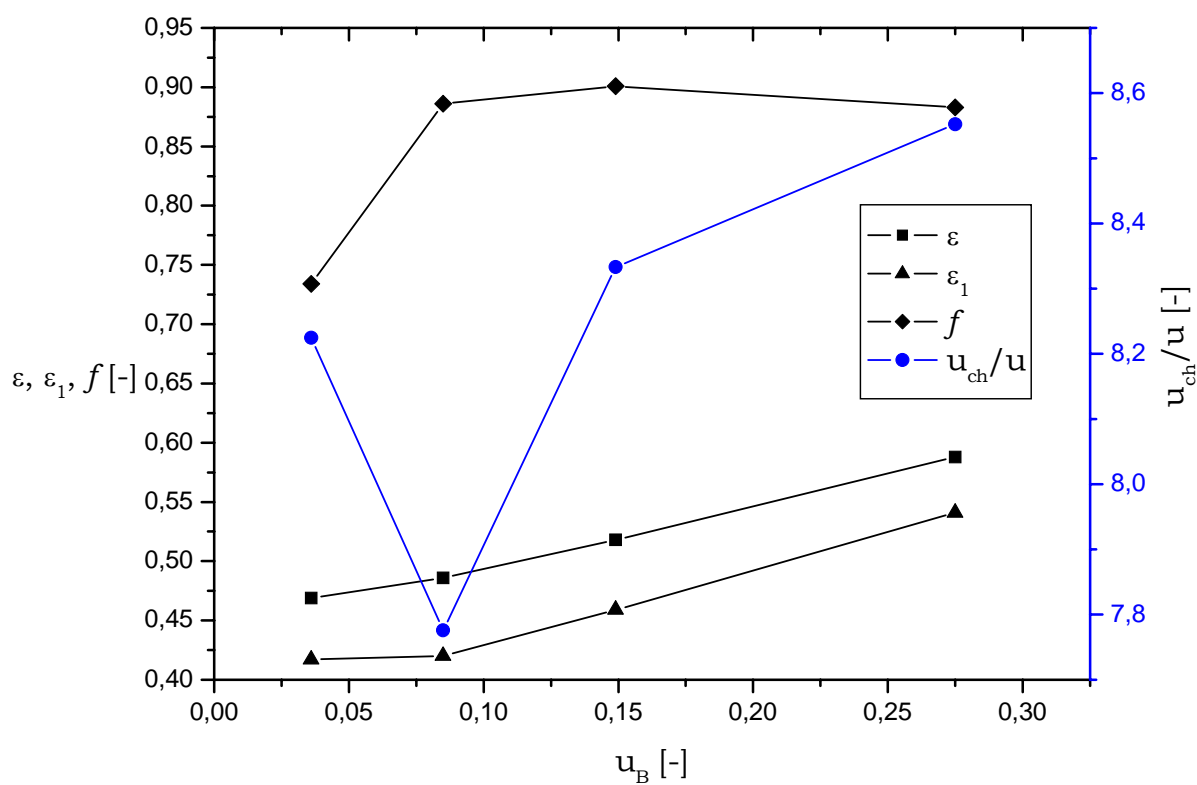
název	A_{ch} [cm ²]	A [cm ²]	χ	S_{ch}/S	ε_i	F_w	u_1 [mm.s ⁻¹]	f	q	$u_{ch,vyp}$ [mm.s ⁻¹]	$u_{ch,exp}$ [mm.s ⁻¹]	δ
PR_S_1_MM	31,17	86,56	0,598	0,215	0,442	0,771	0,1280	0,982	1,037	23,845	22,660	-4,97%
PR_S_2_MM	28,45	86,40	0,598	0,197	0,445	0,771	0,1315	0,968	1,050	15,286	14,419	-5,68%
PR_S_3_MM	23,41	83,04	0,598	0,169	0,453	0,771	0,1439	0,938	1,029	10,245	10,612	3,59%
PR_S_4_MM	17,07	76,75	0,598	0,133	0,438	0,771	0,1223	0,883	1,032	5,711	5,193	-9,07%

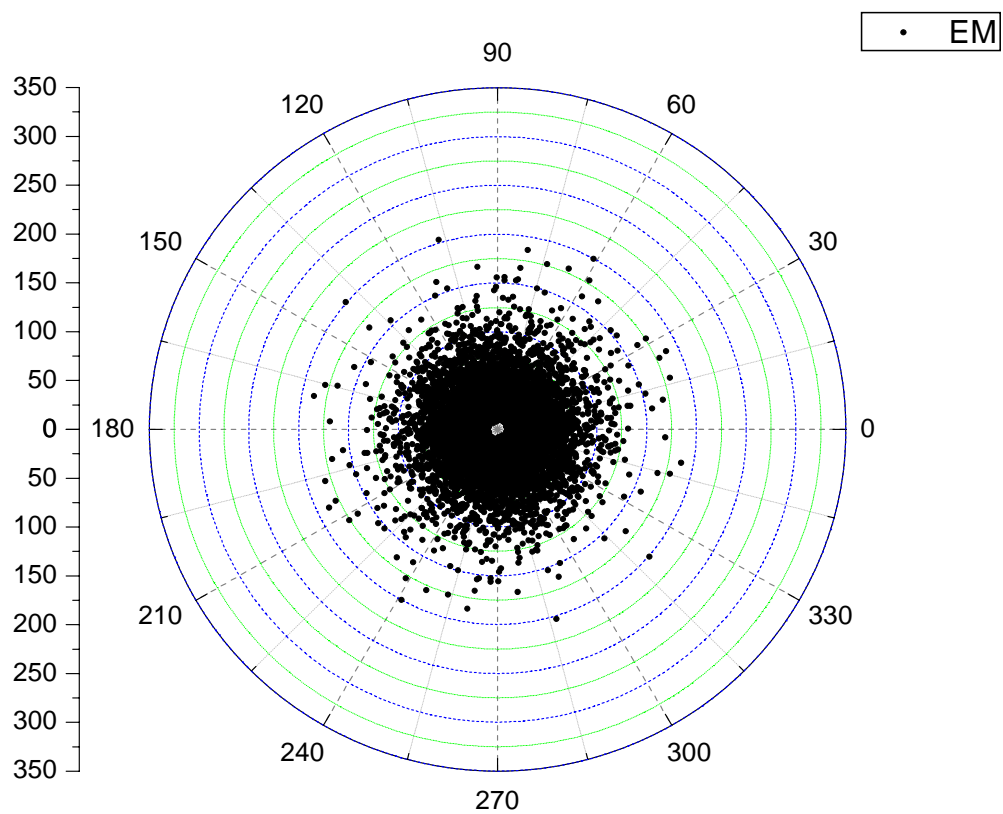
Tab. 33. Parametry zónového modelu pro systém PR_S_MM

Graf 8. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém PR_S_MM

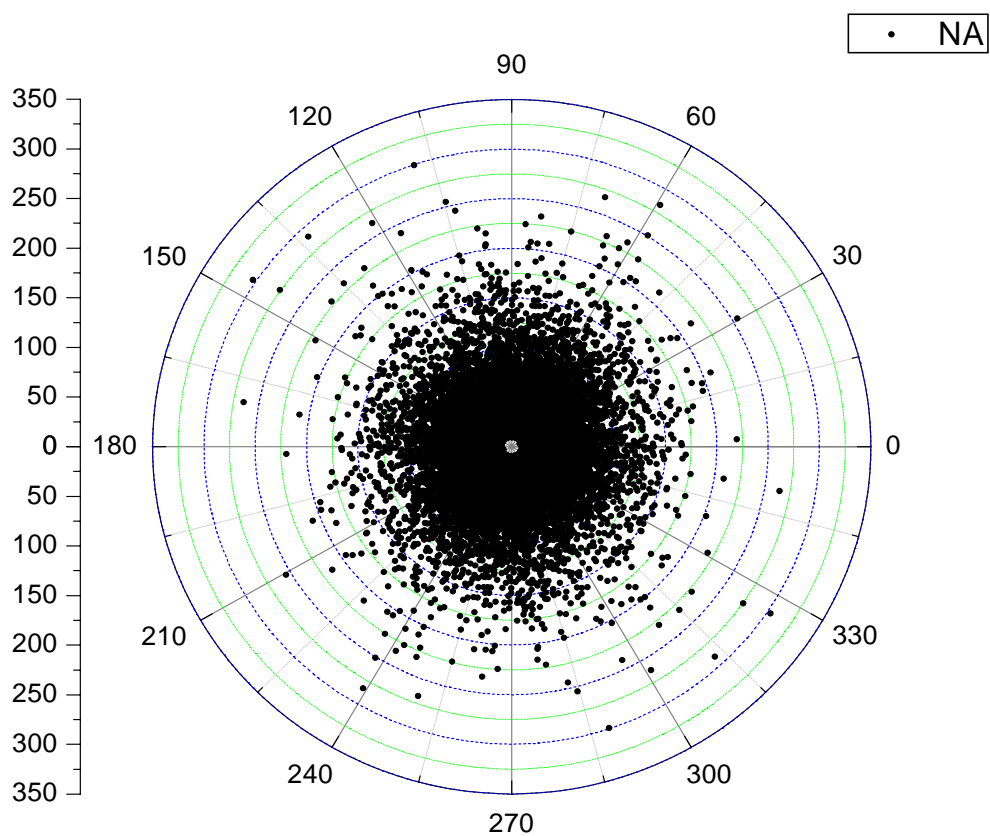
název	A_{ch} [cm ²]	A [cm ²]	χ	S_{ch}/S	ε_1	F_w	u_1 [mm.s ⁻¹]	f	q	$u_{ch,vyp}$ [mm.s ⁻¹]	$u_{ch,exp}$ [mm.s ⁻¹]	δ
PR_V_1_MM	12,11	69,98	0,515	0,089	0,417	0,691	0,1528	0,734	1,083	4,030	3,662	-9,12%
PR_V_2_MM	16,51	74,69	0,515	0,114	0,420	0,691	0,1582	0,886	1,069	8,942	8,395	-6,11%
PR_V_3_MM	16,74	79,83	0,515	0,108	0,459	0,691	0,2395	0,901	1,036	16,833	15,609	-7,27%
PR_V_4_MM	18,62	92,95	0,515	0,103	0,541	0,691	0,5183	0,883	1,027	31,899	30,850	-3,29%

Tab. 34. Parametry zónového modelu pro systém PR_V_MM

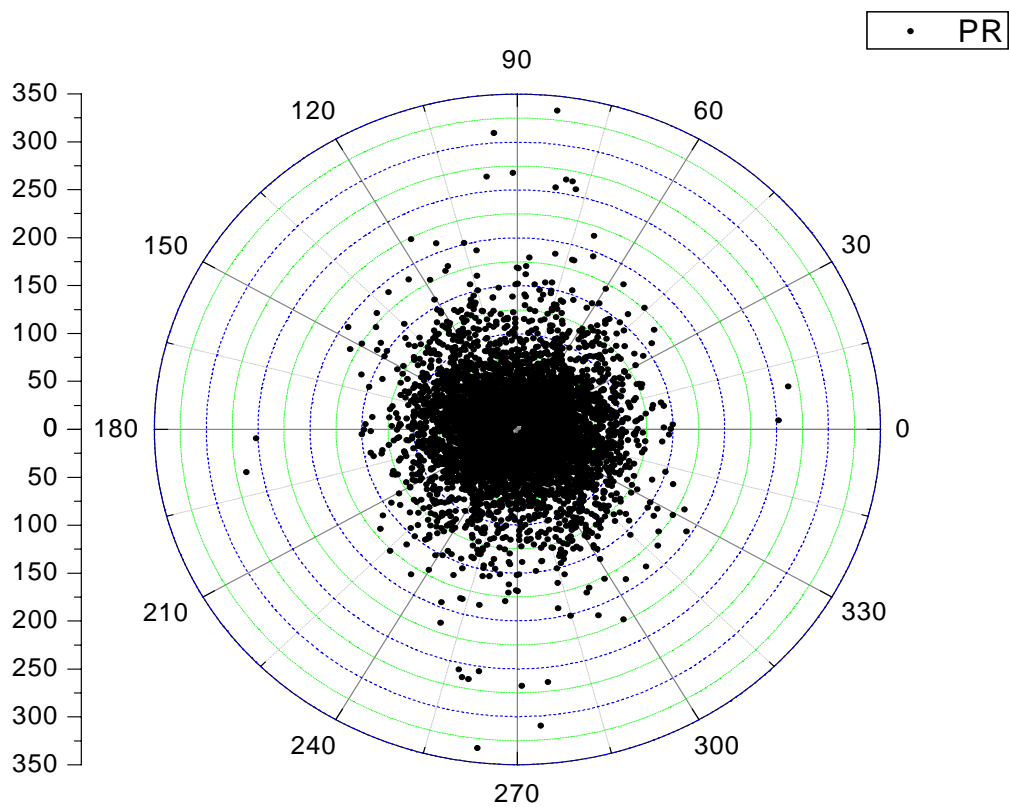
Graf 9. Závislost ε , ε_1 , f , u_{ch}/u na u_B pro systém PR_V_MM



Graf 10. Sférický graf – hodnocení vzdáleností systému EM_V_6a



Graf 11. Sférický graf – hodnocení vzdáleností systému NA_V_3a



Graf 12. Sférický graf – hodnocení vzdáleností systému PR_V_4

ÚDAJE PRO KNIHOVNICKOU DATABÁZI

Název práce	Fluidace vrstev částic neneutonskými kapalinami: vizualizace proudění a struktura vrstev částic.
Autor práce	Alexander Surý
Obor	Chemické inženýrství
Rok obhajoby	2006
Vedoucí práce	Ing. Bedřich Šiška, CSc.
Anotace	Diplomová práce se zabývá experimentálním studiem fluidace kulových částic newtonskými a neneutonskými (viskoelastickými) kapalinami v plouživé oblasti toku. Je studován vliv reologických vlastností kapalin na průběh expanze, lokální rychlosti proudící kapaliny a strukturu vrstev.
Klíčová slova	neneutonské kapaliny, fluidace, vizualizace, analýza obrazu, zónový model, <i>Distance</i>