

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO – TECHNOLOGICKÁ
KATEDRA CHEMICKÉHO INŽENÝRSTVÍ

STUDIUM STRUKTURY VRSTEV
ČÁSTIC PŘI FLUIDACI
NENEWTONSKÝMI KAPALINAMI

DIPLOMOVÁ PRÁCE

AUTOR PRÁCE: Miloslav Simon
VEDOUČÍ PRÁCE: Ing. Bedřich Šiška, CSc.

2005

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

**STUDY OF STRUCTURE PARTICLE
BEDS AT FLUIDIZATION WITH
NON-NEWTONIAN FLUIDS**

THESIS

**AUTHOR: Miloslav Simon
SUPERVISOR: Ing. Bedřich Šiška, CSc.**

2005

Vysoká škola: Univerzita Pardubice
Katedra: Chemického inženýrství

Fakulta: Chemicko-technologická
Akademický rok: 2004/2005

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

pro S I M O N A MILOSLAVA

stud. obor Chemické inženýrství

Název tématu: Studium struktury vrstev částic při fluidaci neneutonskými kapalinami.

Zásada pro vypracování:

1. Doplňte literární rešerši fluidace vrstev částic neneutonskými kapalinami a vizualizačních metod proudění kapalin vrstvami částic a struktury těchto vrstev při fluidaci.
2. Zvolte vhodné systémy kapalina-částice pro studium struktury fluidní vrstvy a toku kapalin fluidní vrstvou v tzv. "dvourozměrné" koloně obdélníkového průřezu. Jako modelové neneutonské kapaliny použijte vodné roztoky polymerů s různou mírou pseudoplasticity a elasticity.
3. Vypracujte metodiku vizualizace proudění kapaliny vrstvami částic a struktury těchto vrstev metodou zbarvování vstupního proudu kapaliny. Vyberte vhodné typy barviv s ohledem na co nejmenší změnu reologických vlastností použitých kapalin.
4. Vlastní průběh expanze zaznamenejte pomocí videokamery. Vybrané záznamy průběhů expanze fluidní vrstvy vyhodnoťte s ohledem na popis struktury fluidní vrstvy a stanovení lokální rychlosti proudící kapaliny pomocí dostupných metod analýzy obrazu. Diskutujte vliv reologických vlastností kapalin na průběh expanze a strukturu fluidní vrstvy. Výsledky využijte k popisu fluidní vrstvy pomocí zónového modelu.

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 podle § 60 odst. 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 vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

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

V Pardubicích dne 15. května 2005

Miloslav Simon

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá experimentálním studiem expanze vrstev částic fluidovaných newtonskými a neneutonskými (viskoelastickými) kapalinami v plouživé oblasti. Vliv reologických vlastností kapalin na průběh expanze, lokální rychlosti proudící kapaliny a struktura vrstev je zkoumána pomocí metod analýzy obrazu.

V teoretické části jsou shrnuty základní poznatky z reologie, fluidace vrstev částic, vizualizace toku a analýzy obrazu.

Expanze vrstev částic byly sledovány v obdélníkové koloně o rozměrech $800 \times 80 \times 5$ mm. Vrstvy byly tvořeny monodisperzními kulovými částicemi s průměry 3,9 a 3,5 mm. Jako modelové kapaliny byly použity vodný roztok maltózy a vodné roztoky polymerů (hydroxyetylcelulóza a polyakrylamid). Tokové vlastnosti kapalin byly měřeny na rotačním reometru HAAKE RS 150. Viskozitní funkce neneutonských kapalin byly nahrazovány mocninovým a Carreauevým tokovým modelem.

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

Byla vypracována metoda vizualizace toku při fluidaci. Vizualizace bylo použito ke studiu toku kapalin fluidní vrstvou, struktury fluidních vrstev a měření rychlostí kapaliny uvnitř fluidní vrstvy.

Abstract

This thesis deal with experimental investigation of expansion of solid particle beds fluidized with Newtonian and non-Newtonian (viscoelastic) fluids in creeping flow region. The influence of the rheological properties of fluids on expansion course, local velocity of the flowing fluid, and structure of beds is investigated using image analysis.

The theoretical part includes basic knowledge of rheology, fluidization of particle beds, 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 3.9 and 3.5 mm. Water solution of maltose and water solutions of polymers (hydroxyethylcellulose and polyacrylamide) were used as model fluids. The shear stress rate data were measured on rotary rheometer HAAKE RS 150. Viscosity functions of non-Newtonian fluids were expressed by the power law and the Carreau models.

The expansion of the beds were recorded by movie digital camera. Selected pictures were interpreted with methods of image analysis.

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

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Bedřichu Šiškoví, CSc. a Prof. Ing. Ivanu Macháčovi, CSc. za všestrannou pomoc a cenné připomínky při řešení diplomové práce. Dále děkuji paní laborantce Petře Novákové za pomoc s experimentální částí diplomové práce. Můj velký dík patří doktorantce Ing. Heleně Bendové za řadu konstruktivních návrhů. Rovněž bych chtěl poděkovat Donaldu E. Knuthovi, tvůrci typografického systému $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$, a všem autorům jeho nadstavby $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}$, která mi usnadnila sepsání této diplomové práce. V neposlední řadě si dovoluji poděkovat svým rodičům za stálou podporu při studiu.

Obsah

1	Seznam symbolů	10
2	Úvod	12
3	Teoretická část	13
3.1	Základní pojmy z reologie	13
3.1.1	Dokonalá tekutina	13
3.1.2	Newtonská tekutina	13
3.1.3	Nenewtonská tekutina	14
3.1.3.1	Čistě viskózní časově nezávislé	14
3.1.3.2	Čistě viskózní s časově závislou složkou rychlosti deformace	14
3.1.3.3	Viskoelastické kapaliny	14
3.1.3.4	Tokové modely nenewtonských kapalin	15
3.2	Fluidní vrstva	15
3.2.1	Základní pojmy	15
3.2.2	Fluidace newtonskými kapalinami	16
3.2.3	Fluidace nenewtonskými kapalinami	17
3.2.3.1	Rovnice expanze vycházející z kapilárního a buňkového modelu vrstvy	17
3.2.3.2	Rovnice získané modifikací Richardsonovy-Zakiho teorie fluidní vrstvy	18
3.2.3.3	Rovnice expanze, vycházející z teorie podobnosti	18
3.2.3.4	Prahová rychlost fluidace	20
3.2.4	Stabilita a nerovnoměrnosti fluidní vrstvy	20
3.2.5	Zónový model expanze	21
3.3	Vizualizace proudění kapalin vrstvami částic	22
3.3.1	Optické metody	22
3.3.1.1	Vizualizace pomocí barviv	22
3.3.1.2	Vizualizace pomocí elektrolýzy	23
3.3.1.3	Metoda PIV	24
3.3.2	Fyzikální metody	24
3.3.2.1	Dopplerův posun laserového paprsku	24
3.3.2.2	Nukleární Magnetická Rezonance	25
3.4	Analýza obrazu	25
3.4.1	Snímání obrazu	26
3.4.1.1	Využití DV kamery	26
3.4.1.2	Inter-frame komprese uloženého videa	27
3.4.2	Předzpracování obrazu	27
3.4.3	Segmentace na objekty	28
3.4.3.1	Segmentace prahováním	28
3.4.4	Analýza objektů	28
4	Experimentální část	30
4.1	Fluidační zařízení	30
4.2	Použité částice	31
4.3	Použité kapaliny	31

4.3.1	Obarvení kapalin	31
4.4	Měření reologických vlastností kapalin	32
4.5	Měření pádové rychlosti	32
4.6	Měření expanze vrstvy	32
4.7	Videozáznam fluidace a vizualizace	32
5	Vyhodnocení výsledků měření	34
5.1	Reologická data	34
5.2	Pádové rychlosti	34
5.3	Expanze fluidních vrsvev	35
5.4	Zpracování a analýza obrazu	35
5.4.1	Zónový model	36
5.4.2	Mezerová rychlost	38
6	Rozbor a diskuze výsledků	39
6.1	Experimentální zařízení	39
6.2	Expanze vrstev částic	39
6.3	Vizualizace toku kapaliny fluidní vrstvou	39
7	Závěr	42
	Literatura	43
	Seznam tabulek	46
	Seznam obrázků	47
	Příloha	49

1 Seznam symbolů

Symbol	Význam	Jednotka
a	měrný povrch vrstvy (8)	$[\text{m}^{-1}]$
a	kratší strana obdélníku, šířka stěrby (32)	$[\text{m}]$
A	plocha fluidní vrstvy	$[\text{m}^2]$
A_{ch}	plocha kanálek	$[\text{m}^2]$
A_s	povrch částic	$[\text{m}^2]$
Ar	Archimédovo kritérium	$[-]$
Ar_n	Archimédovo kritérium pro mocninovou kapalinu	$[-]$
b	delší strana obdélníku, šířka kolony (32)	$[\text{m}]$
c_D	součinitel odporu	$[-]$
d	průměr kulové částice	$[\text{m}]$
d_F	Feretův průměr	$[\text{m}]$
D	průměr kolony	$[\text{m}]$
D_E	ekvivalentní průměr kolony	$[\text{m}]$
f	podíl kapaliny protékající kanálky (46)	$[-]$
f	frekvence záření	$[\text{Hz}]$
f_D	Dopplerův posun	$[\text{Hz}]$
F_W	korekční faktor na vliv stěn	$[-]$
g	tíhové zrychlení	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
h	výška vrstvy	$[\text{m}]$
H	hlavní osa elipsy	$[\text{m}]$
k	koeficient v rovnici (15)	$[-]$
K	parametr mocninového modelu (5)	$[-]$
l	délka dráhy pádu částice	$[\text{m}]$
l_e	naměřená délka dráhy pohybu obarvené kapaliny	$[\text{m}]$
L	naměřená délka dráhy pohybu obarvené kapaliny ve svislém směru	$[\text{m}]$
m	parametr Carreauova modelu (6)	$[-]$
m_s	hmotnost částic	$[\text{kg}]$
n	parametr mocninového modelu (5)	$[-]$
q	faktor kroutivosti	$[-]$
Re	Reynoldsovo kritérium	$[-]$
Re_n	Reynoldsovo kritérium pro mocninovou kapalinu	$[-]$
Re_C	Reynoldsovo kritérium pro Carreauovu kapalinu	$[-]$
Re_t	Reynoldsovo kritérium pro pád částice	$[-]$
Re_{tn}	Reynoldsovo kritérium pro pád částice v mocninové kapalině	$[-]$
Re_{tC}	Reynoldsovo kritérium pro pád částice v Carreauově kapalině	$[-]$
S	průřez kolony	$[\text{m}^2]$
S_{ch}	průřez kanálek v zónovém modelu fluidní vrstvy	$[\text{m}^2]$
t	tloušťka kolony	$[\text{m}]$
\bar{t}	průměrná doba pádu částice	$[\text{s}]$
t_m	interval odčítání hmotnosti	$[\text{s}]$
u	mimovrstvová rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
u_b	bezrozměrná rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
u_{mf}	prahová rychlost fluidace	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
u_i	mezerová rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
u_p	rychlost částice	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$

u_t	pádová rychlost částice	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
$u_{t\infty}$	pádová rychlost částice v neomezené kapalině	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
u_1	mimovrstvová rychlost v zóně částic v zónovém modelu	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
V	objem vrstvy	$[\text{m}^3]$
\dot{V}	objemový průtok	$[\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}]$
V_{ch}	objem kanálek	$[\text{m}^3]$
V_s	objem částic	$[\text{m}^3]$
W	vedlejší osa elipsy	$[\text{m}]$
z	exponent v Richardson–Zakiho rovnici (15),(16)	$[-]$

Řecká abeceda:

α	úhel	$[\circ]$
δ	relativní odchylka	$[-]$
Δ_m	přírůstek hmotnosti	$[\text{kg}]$
$\dot{\gamma}$	rychlost deformace	$[\text{s}^{-1}]$
ε	mezerovitost vrstvy	$[-]$
ε_1	mezerovitost zóny s částicemi v zónovém modelu	$[-]$
ε_{mf}	prahová mezerovitost vrstvy	$[-]$
η	nenewtonská (zdánlivá) viskozita	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
η_0	dolní limitní viskozita pro $\dot{\gamma} \rightarrow 0$	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
η_∞	horní limitní viskozita pro $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
λ	vlnová délka záření	$[\text{m}]$
λ	časový parametr Carreauova modelu (6)	$[\text{s}]$
Λ_t	bezrozměrný časový parametr	$[-]$
μ	dynamická viskozita	$[\text{Pa}\cdot\text{s}]$
ρ	hustota tekutiny	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
ρ_s	hustota částic	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}]$
τ	vazké napětí	$[\text{Pa}]$

Dolní indexy:

vyp	vypočtená hodnota
exp	experimentální hodnota

2 Úvod

V současné době nalézá fluidní technika široké využití v řadě průmyslových technologických procesů, např. biotechnologie, katalytické procesy, adsorpce, sušení, krystalizace, směšování, třídění, granulace, spalování, ohřev, chlazení atd. Fluidní vrstva poskytuje řadu výhodných vlastností, které tak předurčují její široké uplatnění. Mezi ně patří intenzivní pohyb částic ve vrstvě, díky kterému se dosahuje vyšších rychlostí sdílení hmoty a tepla, a tekutost vrstvy, která dovoluje kontinualizovat procesy, kde se pracuje se zrnitým materiálem.

Dlouholetý výzkum toku newtonských tekutin fluidní vrstvou tuhých částic přinesl množství poznatků, avšak srovnatelné množství poznatků pro neneutonské kapaliny zatím chybí. To byl důvod, proč byla i tato oblast zařazena do výzkumného programu KCHI Fakulty chemicko – technologické Univerzity Pardubice.

Výsledky předchozího experimentálního výzkumu na KCHI ukázaly, že při fluidaci vrstev částic viskoelastickými kapalinami přestává být rovnoměrná expanze stabilní, ve vrstvě dochází ke vzniku nehomogenit, kanálů a zvyšuje se axiální cirkulace částic. Výsledkem je snížení očekávané míry expanze vrstvy.

Tato diplomová práce je zaměřena na experimentální studium vlivu reologických vlastností kapaliny na průběh expanze, vizualizace struktury vrstev pomocí zbarvování vstupního proudu kapaliny a stanovení lokálních rychlostí kapaliny pomocí metod analýzy obrazu.

3 Teoretická část

V teoretické části diplomové práce je uveden přehled základních pojmů a vztahů z oblasti reologie a fluidace v systémech s newtonskými i neneutronskými kapalinami, které jsou potřebné pro řešení zadaného problému. V teoretické části je dále uveden přehled vizualizačních metod proudění kapalin vrstvami částic a postup při zpracování a analýze obrazu.

3.1 Základní pojmy z reologie

Reologie je vědní obor, který se zabývá studiem vnitřní reakce látek na působení sil. Působením vnějších sil na reálné látky má za následek jejich uvedení do translačního nebo rotačního pohybu nebo jejich deformaci. Rozlišujeme tři základní druhy deformací:

Elastická deformace je vratná, po skončení působení vnější síly se těleso vrátí do původního tvaru a energie spotřebovaná na deformaci se uvolní.

Plastická deformace je nevratná, po skončení působení vnější síly těleso zůstává v novém tvaru a energie spotřebovaná na deformaci se změní na tepelnou (disipuje).

Viskózní tok je také nevratná deformace, jejíž stupeň po dobu působení vnější síly narůstá a energie spotřebovaná na deformaci se změní na tepelnou (disipuje).

Matematickým vyjádřením tokových vlastností tekutin jsou reologické stavové rovnice, které udávají závislost tenzoru vazkých (deformačních) napětí $\vec{\tau}$ na kinematických tenzorech. Podle tvaru závislosti rozlišujeme různé typy tekutin:

3.1.1 Dokonalá tekutina

Dokonalá tekutina je tekutina, ve které nepůsobí tečná napětí a má nulovou viskozitu. Její reologická rovnice má tvar:

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

Za normálních podmínek dokonalá kapalina neexistuje, ale za teplot blízkých absolutní nule (pod 2,17 K) se kapalné helium stává supratekutým a vykazuje velmi neobvyklé vlastnosti. Například díky kapilární elevaci přetéká stěny nádob, vytéká horním koncem ponořené kapiláry nebo při rotaci nádoby se helium uvnitř nepohybuje [1].

3.1.2 Newtonská tekutina

Mezi newtonské tekutiny patří všechny plyny a nízkomolekulární kapaliny. Newtonské tekutiny mají lineární závislost tenzoru vazkých napětí na tenzoru rychlosti deformace. Pro nestlačitelnou tekutinu má reologická rovnice tvar (tenzorový tvar Newtonova zákona viskozity):

$$\vec{\tau} = -\mu \vec{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

Veličina μ je dynamická viskozita a její hodnota závisí pouze na tlaku a teplotě (u plynů s rostoucí teplotou roste, u kapalin klesá).

3.1.3 Nenewtonská tekutina

Nenewtonské tekutiny vykazují odlišné chování než newtonské tekutiny a tím pádem je tvar jejich reologických rovnic složitější. Dělí se např. na:

1. čistě viskózní časově nezávislé
2. čistě viskózní s časově závislou složkou rychlosti deformace
3. viskoelastické

3.1.3.1 Čistě viskózní časově nezávislé

Příkladem jsou zobecněné newtonské kapaliny, pro které podobně jako v rovnici (2) platí:

$$\vec{\tau} = -\eta \vec{\dot{\gamma}} \quad (3)$$

kde η je nenewtonská (zdánlivá) viskozita, která je závislá na tlaku, teplotě a druhém invariantu tenzoru rychlosti deformace nebo tenzoru vazkých napětí. Rovnici (3) lze zapsat ve skalárním tvaru:

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

kde τ je velikost tenzoru vazkých napětí a $\dot{\gamma}$ rychlosti deformace. Podle průběhu závislosti (4) lze čistě viskózní kapaliny dělit na:

- a) **pseudoplastické kapaliny**, u kterých dochází k poklesu zdánlivé viskozity s rostoucí rychlostí deformace. Mezi ně patří např. taveniny a roztoky polymerů.
- b) **dilatantní kapaliny** jsou opakem pseudoplastických – s rostoucí rychlostí deformace roste zdánlivá viskozita. Příkladem jsou vysoce koncentrované suspenze.
- c) **viskoplastické kapaliny** mají mez kluzu – při nízkých hodnotách vazkého napětí netečou, plasticky se deformují a až po dosažení mez kluzu se s rostoucím napětím začne zvyšovat rychlost deformace.

3.1.3.2 Čistě viskózní s časově závislou složkou rychlosti deformace

U těchto kapalin dochází ke změně zdánlivé viskozity s dobou působícího napětí. Dělí se na tixotropní a antitixotropní (reopexní). U tixotropních kapalin klesá zdánlivá viskozita s dobou působení napětí až do dosažení rovnovážné hodnoty. Příkladem jsou nátěrové hmoty. U reopexních kapalin je tomu naopak (zdánlivá viskozita roste s dobou působení napětí až do dosažení rovnovážné hodnoty).

3.1.3.3 Viskoelastické kapaliny

Při působení napětí na viskoelastickou kapalinu se projevuje viskózní i elastická deformace. Mají proto určitou tvarovou „paměť“ a jejich chování ovlivňuje i historie deformace. Projevují též normálová napětí při smykových tocích a při míchání rotačním míchadlem Weissenbergův efekt („šplhání“ kapaliny po hřídeli míchadla).

3.1.3.4 Tokové modely neneutonských kapalin

K matematickému vyjádření závislosti (4) se využívají různé poloempirické nebo empirické modely. Od modelu je požadován adekvátní popis reologického chování a snadnost stanovení jeho parametrů pomocí měření na reometru. Pro zobecněné newtonské kapaliny bez meze kluzu se používají např. tyto modely [2], [3]:

Ostwald-De Waeluw (mocninový) model

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (5)$$

Je to jednoduchý dvouparametrový model, kde K je součinitel konzistence a n index toku. Pro pseudoplastické kapaliny je $n < 1$, pro dilatantní $n > 1$ a pro newtonské je $n = 1$ a $K = \mu$. Jeho nevýhodou je, že popisuje průběh tokové křivky pouze v omezeném rozsahu.

Carreaův model

$$\tau = \left\{ \eta_{\infty} + \frac{\eta_0 - \eta_{\infty}}{[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{(1-m)}{2}}} \right\} \dot{\gamma} \quad (6)$$

Je to složitější čtyřparametrový model, který popisuje průběh tokové křivky v širokém rozsahu rychlostí deformace. η_0 je dolní limitní viskozita pro $\dot{\gamma} \rightarrow 0$, obdobně η_{∞} je horní limitní viskozita pro $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$, λ je časový parametr a m je parametr analogický indexu toku.

3.2 Fluidní vrstva

3.2.1 Základní pojmy

Fluidní vrstva – nefixovaná vrstva částic o hustotě ρ_s větší než je hustota tekutiny ρ , která touto vrstvou proudí ve směru proti působení tíhové síly, za podmínky, kdy síla, kterou působí tekutina na částice, převyší jejich tíhu zmenšenou o vztlak. Částice se od sebe navzájem oddělí a vznášejí se. Při dalším zvyšování rychlosti tlaková ztráta tekutiny nestoupá, fluidní vrstva expanduje a zvětšuje se její mezerovitost. Tento stav vrstvy se nazývá fluidace.

Mezerovitost vrstvy – je definována jako podíl volného objemu ve vrstvě ku celkovému objemu:

$$\varepsilon = \frac{V - V_s}{V} \quad (7)$$

kde V je celkový objem vrstvy a V_s objem částic.

Měrný povrch vrstvy – je poměr plochy částic k celkovému objemu vrstvy:

$$a = \frac{A_s}{V} = \frac{A_s}{V_s}(1 - \varepsilon) \quad (8)$$

Mimovrstvová rychlost – je objemový průtok tekutiny vztažený k průřezu zařízení:

$$u = \frac{\dot{V}}{S} \quad (9)$$

Mezerová rychlost – je objemový průtok tekutiny vztažený k volnému průřezu vrstvy:

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

Práh fluidace – je určen dosažením mimovrstvové rychlosti tekutiny, kdy je síla odporu v rovnováze s tíhou částic, zmenšenou o vztlak (počátek fluidace). 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 z aparátu, povrch vrstvy přestane být zřetelný a vrstva se rozpadá. Prahovou rychlost úletu můžeme pokládat za rovnou hodnotě pádové rychlosti jednotlivých částic. Existence fluidní vrstvy je tedy ohraničena prahovou rychlostí fluidace a prahovou rychlostí úletu.

Expanzní křivka – je grafické vyjádření závislosti mimovrstvové rychlosti (často v bezrozměrném tvaru) na mezerovitosti. Používá se k popisu expanze vrstvy.

Rovnoměrná fluidní vrstva – je strukturně homogenní, koncentrace částic nebo mezerovitost jsou v celé vrstvě přibližně konstantní.

Nerovnoměrná fluidní vrstva – se vyznačuje změnou koncentrace částic nebo mezerovitosti s místem ve vrstvě.

3.2.2 Fluidace newtonskými kapalinami

Hydrodynamikou fluidace newtonskými kapalinami se zabývalo velké množství autorů a jsou shrnuty v řadě monografií a publikací, např. [4],[5],[6]. Na základě různých zjednodušujících představ tak vznikl kapilární model nebo buňkový model vrstvy. Další přístup je založen na teorii podobnosti.

Expanze rovnoměrné fluidní vrstvy, tvořené kulovými částicemi se popisují kritériálními rovnicemi v různých tvarech. Jednou z možností jsou vztahy mezi Reynoldsovým a Archimédovým kritériem, která jsou definována jako:

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (11)$$

$$Re_t = \frac{du_t\rho}{\mu} \quad (12)$$

$$Ar = \frac{gd^3(\rho_s - \rho)\rho}{\mu^2} \quad (13)$$

kde u_t je pádová rychlost částice. Pro svou jednoduchost je hodně využívána rovnice autorů [7]:

$$Re = \frac{Ar\varepsilon^{4,75}}{18 + 0,6\sqrt{Ar\varepsilon^{4,75}}} \quad (14)$$

Dalším z využívaných tvarů kritériálních rovnic je vztah:

$$\frac{u}{u_t} = k\varepsilon^z \quad (15)$$

kde z je funkcí Re nebo Ar a k je koeficient. Richardson a Zaki [11] publikovali závislost:

$$\frac{u}{u_t} = \varepsilon^z \quad (16)$$

kde koeficient z se pro plouživou a přechodnou oblast určí ze vztahů:

$$\text{pro } Re_t < 0,2 \quad z = 4,65 + 20 \frac{d}{D} \quad (17)$$

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

$$\text{pro } 1 < Re_t < 200 \quad z = \left(4,4 + 18 \frac{d}{D}\right) Re_t^{-0,1} \quad (19)$$

$$\text{pro } Re_t > 200 \quad z = 2,4 \quad (20)$$

kde d je průměr částice a D průměr kolony.

Průběh expanze fluidní vrstvy newtonskými kapalinami popisuje řada dalších empirických i poloempirických rovnic, které lze nalézt např. v [4], [8], [12].

Prahovou rychlost fluidace u_{mf} lze určit dosazením prahové mezerovitosti ε_{mf} do výše uvedených vztahů pro expanzi fluidní vrstvy [5], [8]. Prahová mezerovitost závisí na tvaru částic a vlivu stěn kolony, pro vrstvy kulových částic se zanedbatelným vlivem stěn se obvykle pohybuje od 0,38 do 0,42.

3.2.3 Fluidace nenewtonskými kapalinami

Pro popis fluidace nenewtonskými kapalinami se používají stejné modelové představy jako pro newtonské kapaliny doplněné o příslušné tokové modely, vyjadřující reologické chování kapalin. Viskozitní funkce kapalin jsou vyjadřovány nejčastěji mocninovým (5) nebo Carreauovým modelem (6).

3.2.3.1 Rovnice expanze vycházející z kapilárního a buňkového modelu vrstvy

Kapilární model vrstvy předpokládá, že se vrstva chová jako nehybná a kapalina proudí soustavou kanálků různých délek a průměrů. Vychází se z Blake–Kozenyho kapilárního modelu [9]. Buňkový model definuje vrstvu obtékaných částic jako soustavu buněk, složených ze dvou soustředných koulí. Často používaný je Happelův buňkový model neomezeného povrchu [10].

Výslednou rovnici, popisující expanzi vrstvy, odvozenou pro fluidaci částic mocninovou kapalinou na základě kapilárního a buňkového modelu lze formulovat vztahem:

$$Ar_n = f_1(n, \varepsilon) Re_n^{\frac{n}{2-n}} + f_2(n, \varepsilon) Re_n^{\frac{2}{2-n}} \quad (21)$$

kde Ar_n a Re_n jsou Archimedovo a Reynoldsovo kritérium pro mocninovou kapalinu:

$$Ar_n = \frac{3}{4} c_D Re_n^{\frac{2}{2-n}} = \frac{gd^{\frac{2+n}{2-n}} (\rho_s - \rho) \rho^{\frac{n}{2-n}}}{K^{\frac{2}{2-n}}} \quad (22)$$

$$Re_n = \frac{d^n u^{2-n} \rho}{K} \quad (23)$$

Funkce $f_1(n, \varepsilon)$ a $f_2(n, \varepsilon)$ závisí na mezerovitosti vrstvy ε a indexu toku n . V [13] lze najít jejich různá vyjádření lišící se způsobem odvození.

3.2.3.2 Rovnice získané modifikací Richardsonovy-Zakiho teorie fluidní vrstvy

Richardson–Zakiho rovnici (16) lze použít i pro fluidaci neneutonskými kapalinami, když se kritérium Re_t modifikuje pro mocninou kapalinu a místo pádové rychlosti u_t se použije pádová rychlost v neomezené kapalině $u_{t\infty}$ [14]:

$$Re_{tn} = \frac{d^n u_{t\infty}^{2-n} \rho}{K} \quad (24)$$

Autoři [15] navrhli rovnici pro výpočet mezerovitosti vrstvy pro newtonskou a mocninovou kapalinu:

$$\varepsilon = \left[\left(\frac{18Ku^n}{d^{1+n}} + 3\sqrt{\frac{K\rho u^{2+n}}{d^{2+n}} + \frac{0,3\rho u^2}{d}} \right) \frac{1}{(\rho_s - \rho)g} \right]^{\frac{1}{3,8n+1}} \quad (25)$$

Rozsah platnosti stanovili autoři na $8,14 < Re_t < 3947$ pro newtonskou kapalinu a $87 < Re_{tn} < 420$ a $0,561 < n < 0,84$ pro mocninovou kapalinu.

3.2.3.3 Rovnice expanze, vycházející z teorie podobnosti

Rovnice expanze, získané pomocí teorií podobnosti, vycházejí z analýzy pohybové rovnice pro obtékání osamocené kulové částice mocninovou kapalinou. Vztahy lze vyjádřit ve formě kritériálních závislostí:

$$f\left(\frac{u}{u_t}, Re_{tn}, \varepsilon, n, \frac{d}{D}\right) = 0 \quad (26)$$

Expanze fluidní vrstvy závisí na druhu a míře neneutonského chování, režimu proudění a vlivu stěn zařízení. Ulbrichová [16], Machač aj. [17] zjistili, že při fluidaci pseudoplastickými suspenzemi mají experimentálně získané křivky v logaritmických souřadnicích lineární průběh a publikovali závislost:

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

s rozsahem platnosti $0,25 < n < 0,88$; $0,05 < \frac{d}{D} < 0,24$; $7,10^{-4} < Re_{tn} < 0,2$. Nevýhodou představuje nutnost znát prahovou rychlost fluidace a prahovou mezerovitost. Spojením s rovnicí (21) získali výsledný vztah:

$$u = \left[\frac{d^{n+1}(\rho_s - \rho)g}{12,5K} \right]^{\frac{1}{n}} \frac{n}{(9n + 3)} \frac{\varepsilon_{mf}^{(\frac{1}{n} + 2 - z)}}{(1 - \varepsilon_{mf})} \varepsilon^z \quad (28)$$

kde exponent z má tvar:

$$z = 13,27 - 6,97n - 15,67 \frac{d}{D} \quad (29)$$

Fluidací viskoelastickými kapalinami dochází k porušení rovnoměrnosti vrstvy pevných částic, vznikají kanálky a nehomogenity v rozložení částic. Důsledkem je snížení míry expanze vrstvy – klesá hodnota $d(\log \varepsilon)/d(\log u)$.

Autoři [18],[19] zkoumali mezerovitost vrstev při fluidaci kulových částic pseudoplastickými polymery a pro plouživou oblast toku získali vztah s rozsahem platnosti pro $0,34 < n < 1$ a $Re_{tn} < 0,5$:

$$\varepsilon = \left(\frac{u}{u_t} \right)^{0,218 - 0,404 \frac{d}{D}} - 0,862(1 - n) \left(\frac{u}{u_t} \right)^{0,802 - 1,36 \frac{d}{D}} \quad (30)$$

Novotný [20] studoval možnost použití této rovnice pro fluidaci v kolonách obdélníkového průřezu. Zjistil, že odchylka hodnot mezerovitostí vypočítaných a zjištěných experimentem, je minimální při použití substituce:

$$\frac{d}{D} = 0,417 \frac{d}{D_E} \quad (31)$$

kde D_E je ekvivalentní průměr obdélníkové kolony definovaný jako [21]:

$$D_E = \frac{2ab}{a+b} - \frac{2bd}{b+d} \quad (32)$$

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

Přesnější popis expanze vrstev viskoelastickými kapalinami lze obdržet aplikací Carreauova modelu (6). Kriteriaální rovnice má tvar:

$$f\left(\frac{u}{u_t}, Re_{tC}, \varepsilon, m, \Lambda_t, \frac{d}{D}\right) = 0 \quad (33)$$

Re_{tC} je Reynoldsovo kriteérium pro pád částice v Carreauově kapalině:

$$Re_{tC} = \frac{du_t\rho}{\eta_0} \left(1 + \Lambda_t^2\right)^{\frac{1-m}{2}} \quad (34)$$

Parametr Λ_t je bezrozměrný časový parametr, kterým lze charakterizovat míru elasticity kapaliny. Je definován výrazem:

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

Mikulášek [22], Machač aj. [23] publikovali empirický vztah s rozsahem platnosti $Re_{tC} < 0,3$; $0,18 < \frac{d}{D} < 0,139$; $0 < \Lambda_t < 87$; $0,35 < m < 1$:

$$\varepsilon = \left(\frac{u}{u_t}\right)^{0,218-0,404\frac{d}{D}} - 0,224 \left(1 + 4,75\frac{d}{D}\right) \Lambda_t^{0,5m} \left(\frac{u}{u_t}\right)^{1,55m} \quad (36)$$

Rovněž zjistil, že v přechodné oblasti ($Re_{tC} > 0,3$) s rostoucí hodnotou Reynoldsova kritéria slábne vliv elasticity a stěn, takže průběh expanze se blíží průběhu expanze newtonské kapaliny. Po překročení kritické hodnoty $Re_{tC}^* = 2,8\Lambda_t^{0,5}$ lze průběh expanze popsat Richardson–Zakihovo rovnicí (16). Pro exponent z je použita empirická rovnice:

$$z = \left(4,7 + 8,8\frac{d}{D}\right) Re_{tC}^{-0,1} \quad (37)$$

Autoři [12] upravily vztah pro exponent z na:

$$z = \left(4,7 + 6\frac{d}{D}\right) Re_{tC}^{-0,1} \quad (38)$$

Autoři [24] publikovali pro koeficient z při fluidaci vrstev kulových částic v obdélníkových kolonách vztah:

$$z = \left(4,7 + 3\frac{d}{D_E}\right) Re_{tC}^{-0,1} \quad (39)$$

Podle průběhu expanzních křivek v kolonách kruhového i obdélníkového průřezu je zřejmé, že v logaritmických souřadnicích je možné tento průběh rozdělit na dva navazující úseky, které lze popsat [24], [30]:

$$\frac{u}{u_1} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_1} \right)^{z_1} \quad (40)$$

$$\frac{u}{u_2} = \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_2} \right)^{z_2} \quad (41)$$

kde indexem 1 a 2 jsou označeny souřadnice charakteristických bodů ležících ve spodní nebo v horní části expanzní křivky a směrnice spodního nebo horního lineárního úseku.

3.2.3.4 Prahová rychlost fluidace

K výpočtu prahové rychlosti fluidace u_{mf} vrstev částic čistě viskózními kapalinami lze použít konkrétní tvar rovnice (21), s tím že se za hodnotu mezerovitosti ε dosadí prahová mezerovitost ε_{mf} [13].

Autoři [23] se zabývali určením prahové rychlosti z rovnic vycházejících z teorie podobnosti. Na základě experimentů navrhují pro fluidaci kulových částic v oblasti podmínek $0,35 < n < 1$ a $0,41 < \varepsilon_{mf} < 0,49$ vztahy:

$$\text{pro } Re_{tn} < 0,3 \quad \frac{u_{mf}}{u_t} = 0,018 \quad (42)$$

$$\text{pro } 0,3 < Re_{tn} < 165 \quad \frac{u_{mf}}{u_t} = 0,024 Re_{tn}^{0,2} \quad (43)$$

Autoři [24] uvažovali vliv stěn na prahovou rychlost fluidace a pro určení prahové rychlosti fluidace v kolonách kruhového a obdélníkového průřezu navrhují pro plouživou oblast toku $Re_{tC} < 0,3$ rovnici:

$$\frac{u_{mf}}{u_t} = 0,018 \left(1 + 0,33 \frac{d}{D_E} \right) \quad (44)$$

3.2.4 Stabilita a nerovnoměrnosti fluidní vrstvy

Fluidace v systémech newtonská kapalina – tuhá částice je obvykle rovnoměrná. Fluidní vrstva je však nestejnorodý systém s komplikovanou vnitřní strukturou podléhající náhodným změnám. Přejdem rovnoměrné fluidní vrstvy v nerovnoměrnou se zabývá hydrodynamická teorie stability fluidní vrstvy [5], [25]. Podmínky přechodu rovnoměrné fluidní vrstvy v nerovnoměrnou studoval a kritérium charakterizující tyto podmínky navrhli ve svých pracích Wallis [26] nebo Foscolo aj. [27].

Při optickém pozorování můžeme nerovnoměrné vrstvy dělit na kanálkující, bublající, pístující a gejzírující. Nerovnoměrnosti mohou vznikat přímo ve vrstvě vlivem rozdělovače tekutiny [28]. Ve vrstvě přiléhající k rozdělovači se vytvoří pulsace, které buď ve fluidní vrstvě zanikají, nebo narůstají a vytvářejí nerovnoměrnosti.

Nerovnoměrnosti ve fluidní vrstvě se zkoumají sledováním lokálních změn mezerovitosti. K tomu účelu se zavádějí čidla do fluidní vrstvy. Jsou to např. kapacitní zóny, magnetické cely, piezoelektrická čidla [5], [29]. Nevýhodou této metody je místní narušení fluidního pole.

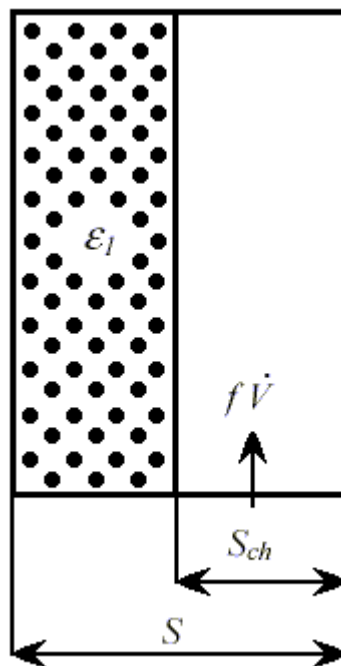
Mohou se též používat metody optické [5], [28]. Přitom se zpravidla používají „dvojrozměrné“ aparáty s tloušťkou odpovídající průměru jedné částice. Jejich nevýhodou je však silný vliv stěn na chování vrstvy a také nemožnost výzkumu neprůhledných vrstev. Namísto lokálních mezerovitostí se zde zkoumá přímo struktura fluidní vrstvy.

Vznik nerovnoměrností ve fluidní vrstvě částic fluidovaných silně elastickými kapalinami pozoroval ve své práci Mikulášek [22]. Při vyšším průtoku kapaliny dochází postupně ke kanálování vrstvy, vytváří se centrální kanál a roste axiální cirkulace částic ve vrstvě. 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 newtonské viskozitě. Částice jsou zřejmě vlivem normálových napětí formovány do kanálů ve vrstvě.

Tvorbu kanálů ve vrstvě částic při fluidaci viskoelastickými kapalinami popisují autoři [30], [23], [12] nebo diplomové práce [20], [31], [32], [33], [34], [35]. Z podobnosti průběhu expanzních křivek získaných při fluidaci ve válcových kolonách a úzkých kolonách obdélníkového průřezu („dvourozměrné“ kolony) [30] lze usoudit i na podobnou strukturu vrstev v obou kolonách. Měření expanze v obdélníkové koloně lze pak využít k vizuálnímu pozorování závislosti struktury vrstvy na reologických vlastnostech kapaliny.

3.2.5 Zónový model expanze

Tento model je založen na podstatě kanálikující fluidní vrstvy [35], [36]. Předpokládá, že fluidní vrstva je rozdělena do dvou zón (obr. 1). V první jsou částice rovnoměrně rozptýleny s mezerovitostí ε_1 a druhá je tvořena rovnoběžnými kanálky bez částic. Celková mezerovitost je potom



Obrázek 1: Zónový model

vyjádřena jako:

$$\varepsilon = \frac{V_{ch} + (V - V_{ch})\varepsilon_1}{V} = \frac{S_{ch}}{S} + \left(1 - \frac{S_{ch}}{S}\right)\varepsilon_1 = f \frac{u}{u_{ch}} + \left(1 - f \frac{u}{u_{ch}}\right)\varepsilon_1 \quad (45)$$

kde S_{ch} je průřez kanálků, u_{ch} rychlost kapaliny v kanálcích a f podíl z objemového průtoku kapaliny \dot{V} , který protéká kanálky:

$$f = \frac{\dot{V}_{ch}}{\dot{V}} = \frac{S_{ch}u_{ch}}{Su} \quad (46)$$

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

$$u_1 = \frac{\dot{V} - \dot{V}_{ch}}{S - S_{ch}} = \frac{\dot{V}(1 - f)}{S(1 - f\frac{u}{u_{ch}})} = u \frac{1 - f}{1 - f\frac{u}{u_{ch}}} \quad (47)$$

Za předpokladu, že mezerovitost zóny s částicemi ε_1 je vyjádřena pomocí rovnice Richardson–Zakiho typu:

$$\varepsilon_1 = \left(\frac{u_1}{F_W u_t} \right)^{\frac{1}{z}}, \quad (48)$$

dosazením rovnic (47) a (48) do rovnice (45) získáme po úpravě vztah:

$$f = 1 - \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon_1} \varepsilon_1^z \frac{u_t}{u} F_W \quad (49)$$

3.3 Vizualizace proudění kapalin vrstvami částic

Proudění kapalin můžeme pozorovat pouhým okem, ale nevidíme proudnice nebo rozložení rychlostních polí. Vizualizace proudění nám může poskytnout takový pohled do rychlostního pole. Proudění tekutin lze zviditelnit pomocí různých metod [37]. Můžeme je rozdělit na optické a fyzikální. Pro fluidní vrstvu je však možné použít pouze některé z nich, které jsou stručně popsány v následujícím textu.

3.3.1 Optické metody

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

3.3.1.1 Vizualizace pomocí barviv

Pozorování pohybu kapaliny obarvené barvivem je jednou z nejstarších a nejjednodušších metod vizualizace. Vizualizační sestava se skládá z vyšetřovaného aparátu zhotoveného z průhledného materiálu, dávkovacího zařízení, osvětlení a záznamového zařízení. Většinou se využívají modrá, zelená a červená barviva, protože to jsou kontrastní odstíny a při zpracování záznamu se většinou využívá RGB (Red – červená, Green – zelená, Blue – modrá) kódování barev, kde mají tyto odstíny vysoké hodnoty svého barevného kanálu. Používají se různá barviva, běžná i speciální.

Běžná barviva

Ze všech metod vizualizace proudění je použití běžných barviv nejobvyklejší metodou. Nejčastěji se používají potravinářská barviva pro svou nejedovatost, dobrou rozpustnost a snadnou dostupnost. Dále je možné použít analytické indikátory (např. Kongo červeň, fenolová červeň, bromkresolová zeleň, indigokarmin, methylenová modř), barviva na textil (např. indigo), berlínskou modř, anilinové barvy, tuš, inkoust, mléko (proti černému pozadí) nebo roztok jódu se škrobovým mazem.

Fluorescentní barviva

Při normálním osvětlení vypadají roztoky fluorescentních barviv téměř průhledně, ale po osvětlení laserovým světlem odpovídající vlnové délky se projeví jejich fluorescence. Fluorescence je schopnost látky absorbovat světlo o určité frekvenci a následně vyžářit světlo o nižší frekvenci. Tuto jedinečnou vlastnost lze výhodně využít při vizualizaci toku tekutin. Protože vyžážené fluorescenční světlo má odlišnou vlnovou délku od excitačního, lze ho snadno odfiltrovat. Navíc pouze barvivo vystavené excitačnímu záření fluoreskuje, takže je možné zviditelnit pouze ozářené oblasti barviva.

Mezi běžně používaná barviva tohoto typu patří fluorescein, rhodamin-B, rhodamin-6G. Při osvětlení argonovým laserem, fluorescein dává zelené zabarvení, rhodamin-B tmavě červené a rhodamin-6G žluté [37].

Fotochromatická barviva

Fotochromatická barviva mají pozoruhodnou schopnost fotochromatismu — reverzibilní změny mezi dvěma stavy o různých absorpčních spektrech. Fotochromatická barviva používaná pro vizualizaci proudění jsou při osvětlení světlem v rozsahu viditelného spektra (VIS) bezbarvá (propouští viditelné spektrum). Při osvětlení 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.

Vizualizace se provede tak, že se barvivo rozpustí přímo v sledované kapalině, pomocí UV lampy nebo laseru se vytvoří barevný proužek nebo mřížka a její pohyb se zaznamenává. Velkou výhodou je možnost opakovaně vytvořit obarvení kdekoli v kapalině a absence dávkovacího zařízení. Bohužel velká většina fotochromických barviv je rozpustná pouze v organických rozpouštědlech, ale existují fotochromatická barviva rozpustná ve vodě. Podrobnější informace lze nalézt v [37], [38], [39], [40].

3.3.1.2 Vizualizace pomocí elektrolýzy

Vizualizace pomocí elektrolýzy je poměrně jednoduchou a levnou vizualizační metodou, která se skládá z vytvoření linek velmi malých vodíkových bublinek elektrolýzou vody. Vodíkové bublinky jsou vytvořeny pomocí velmi tenkého ($25 - 50 \mu\text{m}$) vodivého drátu nataženého mezi dvěma vodivými podporami jako jedna elektroda stejnosměrného obvodu. Druhá elektroda je obvykle kovová nebo uhlíková elektroda umístěná poblíž stěny zařízení.

Při použití drátu jako záporné elektrody se na něm budou tvořit malé vodíkové bublinky, které unášeny proudem umožní tak jeho znázornění. Bublinky jsou obvykle ve velikosti jedné poloviny průměru drátu. Vzestup bublin je v podstatě zanedbatelný ve srovnání s místní rychlostí kapaliny. Pokud se použije drát jako kladná elektroda, bude vytvářet kyslíkové bublinky. Kyslíkové bublinky jsou nevhodné vzhledem k polovičnímu výtěžku bublin v porovnání s vodíkem. Navíc kyslík tvoří pro stejný průměr drátu větší bublinky než vodík, jejichž vznášivost již nelze zanedbat.

Jedna z výhod této metody je možnost umístění drátu v podstatě kdekoli v rychlostním poli a v jakékoliv orientaci se zanedbatelným zásahem do místního toku. Navíc při použití impulsního elektrického napětí lze tvořit linky bublinek v pravidelných rozestupech. Nevýhodou je, že metoda je efektivní jen pro relativně nízké hodnoty Reynoldsova kritéria a že vodíkové bublinky mají sklon se rozptylovat po určité vzdálenosti po proudě. Detaily této metody jsou popsány v [37].

3.3.1.3 Metoda PIV

Metoda PIV (Particle Image Velocimetry) je založena na sledování do kapaliny přidaných částic. Částičky musí být dostatečně malé ($1 - 20 \mu\text{m}$), aby následovaly tok kapaliny bez ovlivnění vlastností kapaliny a musí mít přibližně stejnou hustotu s kapalinou. Přitom musí silně odrážet světlo kvůli kontrastu. Většinou se proto používají částičky na polystyrenové bázi potažené fluorescenční, fosforescenční nebo stříbrnou vrstvou. Proudění kapaliny s částičkami se ve zvoleném řezu osvětlí pomocí laserového paprsku roztaženého pomocí válcové čočky do roviny. Světlo odražené od částic se poté zachytí na digitální videokameře s velkým rozlišením umístěné v pravém úhlu k rovině laseru. Pohyb částic je tak zachycen při 25 – 30 snímcích za sekundu. Pro rychlé toky se používají speciální typy kamer s dvěma CCD čipy. Počítačovým zpracováním získané videosekvence lze pomocí různých algoritmů získat vektorovou mapu rychlostního pole. Místo kamery lze použít fotoaparát nastavený na dlouhý expoziční čas, během kterého zachycením pohybu částic vzniknou na fotografii přímo jejich trajektorie. Podrobnější informace lze nalézt v [37], [41], [42], [43].

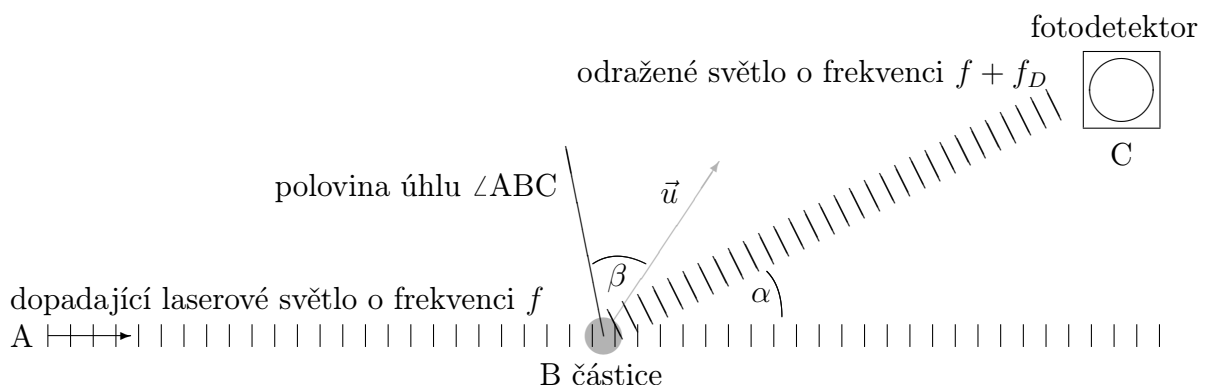
3.3.2 Fyzikální metody

Fyzikální metody využívají měření fyzikálních veličin souvisejících s rychlostí nebo sledování přidaných částic v neviditelné oblasti spektra. Mezi výhody fyzikálních metod patří menší ovlivnění proudění díky použití menších částic. Nevýhodou je dražší a komplikovanější měřicí sestava.

3.3.2.1 Dopplerův posun laserového paprsku

Dopplerův posun je obecně znám z nárůstu a poklesu výšky tónu zvuku, když se jeho zdroj pohybuje směrem k nám a od nás. Dopplerův posun nastává jen u zvuku, ale i u světla. Když se světlo odráží od pohybujícího se předmětu nebo ho předmět vyzařuje, kmitočet světla je posunutý úměrně rychlosti předmětu. Změřením Dopplerova posunu můžeme určit rychlost předmětu. Tento princip měření rychlosti se využívá hlavně v astronomii (rudý a modrý posun spektrálních čar) a u radarových zařízení.

Pro měření rychlosti kapaliny se do ní přidávají malé částice o průměru $0,1 - 10 \mu\text{m}$ a přibližně shodné hustoty s kapalinou (neutrálně vznášivé). Částice jsou ozářeny laserovým světlem o známé frekvenci f . Odražené světlo se analyzuje na fotodetektoru (obr. 2).



Obrázek 2: Dopplerův posun

Dopplerův posun f_D závisí na rychlosti částice u_p , která je prakticky shodná s rychlostí okolní kapaliny \vec{u} , směru pohybu částice (úhel β), vlnové délce světla λ a umístění fotodetektoru

(úhel α):

$$f_D = \frac{2u_p}{\lambda} \cos \beta \sin \frac{\alpha}{2} \quad (50)$$

Přímý způsob jak určit f_D je znát frekvenci dopadající záření f , změřit frekvenci odraženého světla $f + f_D$ a zjistit rozdíl. Je-li dopadající světlo z viditelné oblasti spektra (frekvence v řádu 10^{14} Hz) a rychlost v řádu cm/s, je Dopplerův posun velmi malý (v řádu 10^4 Hz).

Pro lepší určení f_D se používá metoda dvou dopadajících paprsků. V tomto uspořádání se výstupní paprsek z laseru rozdělí na dva paprsky stejné intenzity. Paprsky se nasměrují tak, aby se protnuly, průsečík je měřený objem, který umožňuje bodové měření rychlostí. Částice, které projdou skrz měřený objem odrazí světlo z obou paprsků. Dopplerův posun každého paprsku bude odlišný kvůli odlišným hodnotám úhlů α a β . Sloučením těchto paprsků ve fotodetektoru vznikne na jeho výstupu amplitudově modulovaný signál, jehož amplituda roste a klesá ve frekvenci právě hledaného Dopplerova posunu f_D . Ještě většího zpřesnění lze dosáhnout využitím pulzních křížících se paprsků. Podrobnosti této metody lze nalézt v [37], [43], [44], [45].

3.3.2.2 Nukleární Magnetická Rezonance

Nukleární Magnetická Rezonance (NMR) je metoda, která měří precesní pohyb jaderných spinů v silném magnetickém poli. V působícím statickém magnetickém poli se spiny jader s nenulovým magnetickým momentem srovnají do směru pole. Při působení elektromagnetických pulsů v radiovém oboru, začnou jaderné spiny vykonávat precesní pohyb kolem magnetických siločar. Vrcholový úhel precesního kužele může nabývat jen některých hodnot. Po určité době se spiny začnou vracet zpět do uspořádané polohy, což je provázeno vyzařováním elektromagnetických vln, jejichž frekvence odpovídá změně energie mezi dvěma sousedními precesními kužely. Měřením těchto vln lze zjistit počet atomárních jader a určit strukturu molekuly.

NMR lze ale 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 počítá ze systému diferenciálních rovnic (Blochovy rovnice).

Výhodou NMR je prostorové (3D) změření celého rychlostního pole a možnost použití v neprůhledných kapalinách. Nevýhodou je značné omezení rozměrů a geometrie měřícího prostoru. Podrobnější informace lze nalézt v [43], [46], [47].

3.4 Analýza obrazu

Analýza obrazu je moderní analytická metoda, která nachází v posledních letech široké uplatnění v mnoha oblastech lidské činnosti. Vyžaduje však výkonné počítačové a programové vybavení. V posledních letech prošla značným vývojem a nyní je už nepostradatelnou metodou v mnoha odvětvích od vesmírného výzkumu přes aplikace v medicíně, chemickém průmyslu, kriminalistice až po uplatnění v potravinářských vědách. Jako příklady použití jsou to např. kvalitativní a kvantitativní analýza DNA, počítání mikrobiologických kolonií, analýza rakovinných buněk, analýza otisku prstu, kontrola bankovek atd.

Cílem analýzy obrazu je za pomoci kamery a počítače „okopírovat“ biologický proces probíhající při přenosu a interpretaci informace mezi okem a mozkiem. 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 objektů

3.4.1 Snímání obrazu

Prvním krokem při analýze obrazu je jeho snímání a uložení v digitální podobě. Vlastní proces snímání obrazu většinou začíná definováním podmínek pro dané měření. Tyto podmínky pak musí 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 (umístění kamery, počet a rozmístění světel, intenzita světla, teplota bílého světla, absence okolního světla atd.).

Další nezbytnou operací před samotným snímáním je výběr vhodné optické soustavy (objektiv, mezikroužky) kamery. Dalším krokem je vhodné nastavení kamery (clona, zaostření) a poté délková kalibrace dle etalonu (milimetrový papír, pravítko).

Poté začíná samotné snímání. Obraz je při snímání digitální videokamerou transformován z optického signálu pomocí CCD čipu na digitální signál obsahující matici o počtu řádků a sloupců definovanou rozlišením CCD čipu. Každý bod této matice obsahuje informace o své poloze a o hodnotě svých barevných složek. Tyto body jsou nazývány pixely (z anglického picture element). Tímto způsobem vznikne jeden snímek. Videosekvence vznikne pořizováním alespoň 25 snímků za vteřinu, protože tuto frekvenci snímků vnímá lidské oko jako plynulý pohyb. Při snímání klasickou (analogovou) kamerou je nutné záznam digitalizovat přes TV kartu počítačem. Některé typy moderních digitálních fotoaparátů také podporují záznam videa, ale ve velmi krátké délce a malém rozlišení.

3.4.1.1 Využití DV kamery

V dnešní době jsou již DV (z anglického Digital Video) kamery poměrně cenově dostupné, stejně tak není problém pořídit levný, ale zároveň výkonný počítač schopný úprav videa. Firmy vyrábějící videokamery se snaží podbíhat zákazníkovi a digitální videokamery prodávají jako kompletní balíčky obsahující kromě kamery také hardware k propojení s počítačem a jednoduchý software na střih videa.

Digitální videokamery (Digital8, Mini-DV, DV) jsou v dnešní době špičková zařízení, která ukládají video v digitální podobě. Avšak neukládá se čistě nekomprimované 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. To tedy znamená, že potřebujeme přes 1,5 GB pro každou minutu nekomprimovaného videa. Pro prohlížení a práci s nekomprimovaným videem potřebujeme extrémně rychlé a drahé diskové pole schopné takové velké množství dat v počítači uložit a obsloužit.

Cílem komprese je zmenšení datového toku při zachování vysoké kvality obrazu. Zjistilo se, že lidské oko je více citlivé na změny jasu obrazu, než na změny barvy. Téměř všechny metody komprese videa používají tuto vlastnost lidského vnímání. Tyto techniky pracují tak, že odstraní velkou část barevné informace z obrazu. Může se zdát, že tento způsob komprese

je na videu viditelný, ale není tomu tak. 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. V přenosu je obsažen také zvuk a řídicí signály, takže ukládaný datový tok je nakonec asi 3,6 MB za sekundu. Barvy jsou ve formátu YUV 4:2:0. Y znamená luminaci – jas a U a V – dvě barevné složky určující odstín bodu).

Jako rozhraní pro komunikaci osobních počítačů s DV kamerami bylo vybráno rozhraní Fire Wire, u jehož zrodu stály firmy Apple Computers a Hewlett Packard. Rozhraní bylo později patentováno pod označením IEEE 1394, přesto některé firmy označují rozhraní po svém, např. firma Sony jej nazývá rozhraní iLink. Rozhraní bylo navrženo pro vysoké datové toky a dosahuje rychlosti až 400Mbit/s. Přehrávání záznamu z videokamery do počítače, či jiného zařízení pracující s digitálním videem se pak děje 1:1 – celý záznam přeneseme bez ztráty jakékoliv informace. Další informace lze nalézt v [48].

3.4.1.2 Inter-frame komprese uloženého videa

I když uložené video je zkomprimováno pomocí DV25, zabere jedna hodina záznamu asi 13 GB (3 DVD). Práce s takto velkými soubory by vyžadovala rychlý počítač a velkým diskem. Přitom video lze dále zkomprimovat bez viditelné ztráty kvality na velikost, kdy jedna hodina zabere asi 650 MB (1 CD).

Videokompresní kodeky k tomu používají technologii známou jako inter-frame komprese. Inter-frame komprese využívá výhody toho, že jednotlivé snímky videa jsou často velice podobné snímekům okolním. Místo toho, aby ukládali každý snímek, uloží jen první snímek (tzv. key-frame – klíčový snímek) a dále ukládají rozdíly od předchozího snímku (delta-frame – rozdílový snímek). Po určitém počtu rozdílových snímků, pauze nebo velké změně scény se uloží další klíčový snímek následovaný rozdílovými snímky.

V současné době patří mezi nejlepší kodeky kompaktní s souhrnem pravidel MPEG-4 kodeky DivX 5 a XviD. Další informace o kompresi videa lze nalézt v [49].

3.4.2 Předzpracování obrazu

Když je záznam uložen v digitální podobě v počítači, můžeme přistoupit k jeho předzpracování. Cílem předzpracování obrazu je vylepšení obrazových dat, potlačení nechtěného zkreslení nebo zvětšení určitých obrazových rysů důležitých pro další zpracování. Mezi používané metody patří [50]:

1. Bodové jasové transformace – lze je 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 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 a „škrábanci“ na objektivu kamery a na snímaném objektu.

2. Geometrické transformace – při snímání zakřivených povrch objektu je získán obraz s geometrickým zkreslením. Příkladem jsou družicové snímky Země, které díky jejímu zakřivení neodpovídají mapám. Geometrická transformace je vektorová funkce, která transformuje bod o souřadnicích x, y do bodu x', y' 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 filtrů:
 - (a) Vyhlazovací – vedou k potlačování šumu a drobných fluktuací v obraze, ale zároveň rozmazávají všechny ostré čáry a přechody (hrany). Používají se filtry založené na výpočtu aritmetického průměru, váženého průměru, mediánu atd.
 - (b) Gradientní – jsou opakem vyhlazovacích, zvýrazňují všechny ostré hrany, ale zároveň zesilují šum. Využívá se přitom různých gradientních operátorů (např. Laplaceův, Robertsův, Sobelův, Cannyho atd.).

3.4.3 Segmentace na objekty

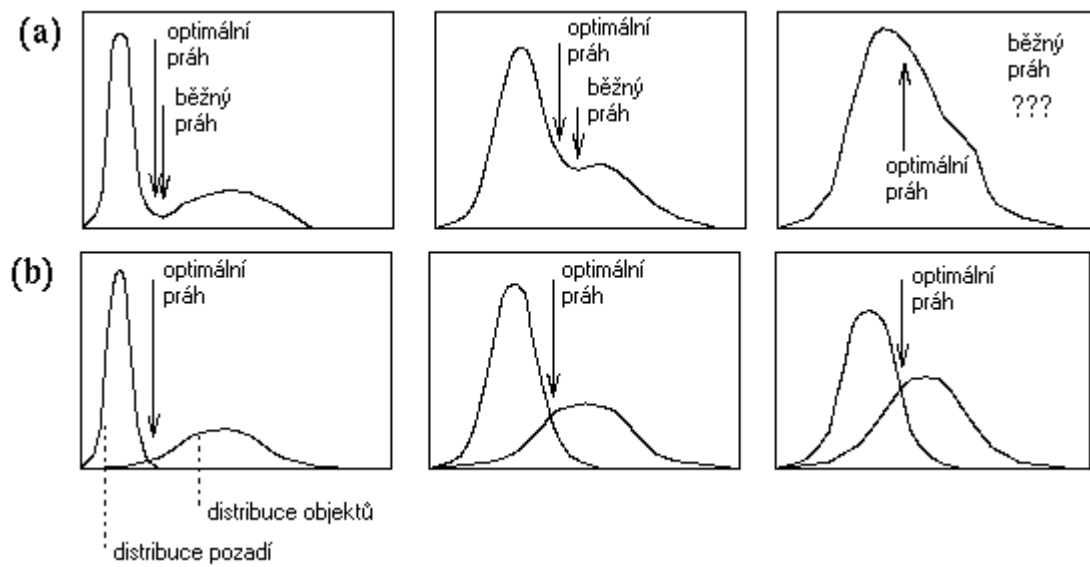
Segmentace obrazu na objekty je proces, který z obrazu vyčlení určité objekty „zájmu“, které jsou určeny k dalšímu zpracování. Mezi používané metody segmentace patří segmentace prahováním, detekcí hran (využívá gradientní operátory), narůstáním oblastí (rozčlení obraz do homogeních oblastí a spojí oblasti, které vyhovují zadanému kritériu) a srovnávání se vzorem [50].

3.4.3.1 Segmentace prahováním

Segmentace prahováním je nejjednodušší a nejpoužívanější metoda. Obsahuje-li obraz kontrastní objekty vzhledem k pozadí, lze nastavit určitou jasovou úroveň (práh) k jejich oddělení. Práh může být globální i lokální. Prahů může být i více než jeden 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 (obr. 3). Má-li prahování kvalitně oddělit objekty od pozadí, je nutné, aby kontrast objektů byl dostatečný a aby distribuce odstínů objektů i pozadí byla minimální. V opačné situaci (obr. 3 vpravo) je možné dosáhnout pouze částečného oddělení.

3.4.4 Analýza objektů

Když jsou objekty „zájmu“ vyčleněny, lze přistoupit k jejich analýze. Lze tak získat jejich počet, rozměry, povrch, rychlost a dráhu jejich pohybu, atd. K analýze objektů, ale i segmentaci a předzpracování se využívají speciální programy. Některé z nich jsou dostupné jako freewareové produkty jako ImageJ – <http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>, nebo komerční produkty jako LUCIA – <http://www.lucia.cz/index.php?lang=cs&inc=news&>, ENVI – <http://www.rsinc.com/envi/>, ArcView – <http://www.esri.com/software/arcview/extensions/imageanalysis/>, VisiQuest – <http://www.accusoft.com/imaging/visiquest/> a mnoho dalších.



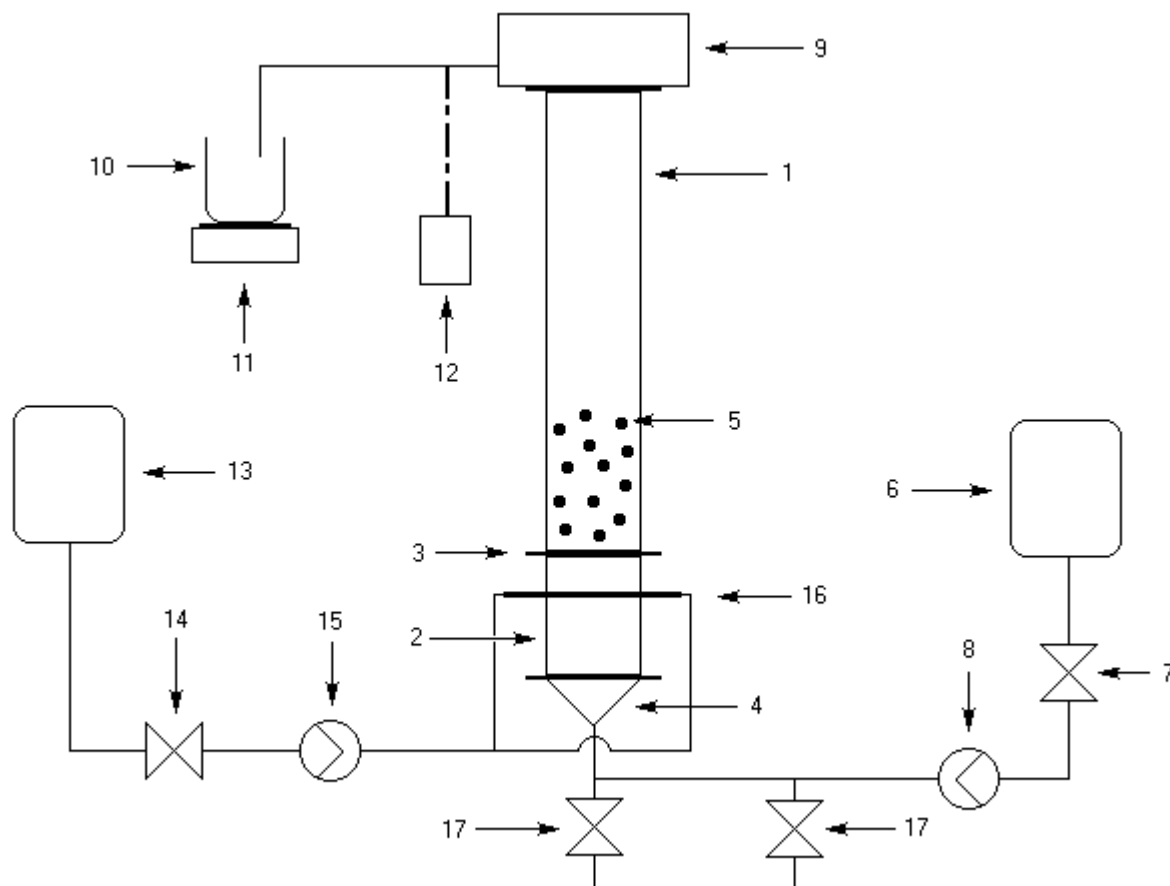
Obrázek 3: Analýza histogramu algoritmem; (a) histogram a rozdíl mezi konvenčním a optimálním prahem; (b) algoritmus nahradí průběh histogramu Gaussovou křivkou normální distribuce a určí optimální práh

4 Experimentální část

V experimentální části diplomové práce je uveden popis měření a záznamu expanze fluidních vrstev v obdélníkové koloně a vizualizace proudění kapaliny fluidní vrstvou. Součástí experimentů je také měření reologických vlastností kapalin a měření pádových rychlostí částic.

4.1 Fluidační zařízení

Schéma fluidačního zařízení je znázorněno na obrázku 4. „Dvourozměrná“ fluidační kolona



Obrázek 4: Schéma fluidačního zařízení

obdélníkového průřezu (rozměry 5x80mm) je zhotovená z makrolonových desek. Skládá se ze dvou částí – horní měřicí část o výšce 800 mm {1} a dolní uklidňující část o výšce 200 mm {2}. Mezi nimi je vložen rošt {3} o tloušťce 0,8 mm s otvory o průměru 1 mm (volná plocha přibližně 11%), který zrovnoměrňoval tok kapaliny. Na dolní část je připevněna mosazná příruba {4}. Pro sledování výšky fluidní vrstvy {5}, je podél horní části kolony umístěno plastové milimetrové měřítko.

Čistý neobarvený roztok fluidační kapaliny se z plastového zásobníku {6} čerpal do kolony přes kohout {7}. Pro čerpání se použila pohonná jednotka PD 5230 se zubovým čerpadlem ZP-3 (výrobce Heidolph) {8}. Roztok odtékal z kolony přepadem do mosazné nádoby {9} připevněné na horní části kolony. Odtud byl roztok veden do nádoby {10} umístěné na laboratorních vahách HF-3200 (výrobce A&D Company, přesnost 0,01 g) {11} propojených přes sériový port

s počítačem, který pomocí programu vytvořeného v Turbo Pascalu 7 snímal přírůstek hmotnosti proteklé kapaliny Δ_m v zadaných časových intervalech t_m a vyhodnocoval mimovrstvovou rychlost podle rovnice:

$$u = \frac{\Delta_m}{t_m S \rho} \quad (51)$$

V průběhu fluidace byla měřena teplota roztoku pomocí digitálního teplotního čidla (přesnost $0,1^\circ\text{C}$) {12}. Po naplnění nádoby {10} se čistá kapalina vracela zpět do zásobníku {6}.

K vizualizaci toku kapaliny fluidní vrstvou byl použit obarvený roztok, který se čerpal ze zásobníku {13} čerpadlem MPC-Z MEMORY V 2.04 (výrobce ISMATEC) {15} do distributoru toku obarvené kapaliny {16}. Distributor zajišťoval rovnoměrnější tok obarveného roztoku a tvořila jej nerezová trubička o průměru 2 mm, do které bylo vyvrtáno 15 otvorů o průměru 0,8 mm. Obarvený roztok se již dále nepoužíval pro vlastní fluidaci ani vizualizaci toku kapaliny.

4.2 Použité částice

Při experimentech byla fluidní vrstva tvořena dvěma typy přibližně monodisperzních skleněných kulových částic — buď modrými kuličkami o průměru 3,9 mm nebo bezbarvými čirými kuličkami o průměru 3,5 mm. Velikost kulových částic byla volena tak, aby se vytvořila jediná vrstva kulových částic podél hloubky fluidační kolony (5 mm). Důvodem této volby byl předpoklad snadnějšího posouzení struktury fluidní vrstvy, když se částice nebudou významněji překrývat. Teoreticky by bylo možné v popsaném experimentálním zařízení použít kulové částice s průměrem nad 2,5 mm, ale, bohužel částice menší než 3,5 mm tvořily shluky, které byly vzájemně mezi sebe a stěny fluidační kolony zaklíněny. Charakteristiky použitých kulových částic jsou uvedeny v tabulce 1. Rozměry kulových částic byly stanoveny mikrometrem, jejich hustota pyknometricky.

4.3 Použité kapaliny

Při fluidaci byly jako modelové kapaliny použity vodný roztok maltózy (newtonská kapalina, fa Amylon Havl. Brod) a vodné roztoky polymerů (nenewtonské kapaliny) – Natrosolu (hydroxyethylcelulóza, fa Herkules Powder Company) a Praestolu (polyakrylamid, fa Chemische Fabrik Stockhausen GmbH). Roztok maltózy byl připraven rozmícháním potřebného množství destilované vody v zahuštěném maltózovém sirupu. Roztoky polymerů byly připraveny pomalým přidáváním navážky práškového polymeru do promíchávané destilované vody. Pro potlačení biologické degradace byl do roztoků polymerů přidán 36% vodný roztok formaldehydu (5 ml na 1000 ml roztoku polymeru). Roztok Natrosolu byl přes den míchán, přes noc ponechán v klidu. Práškový Praestol se rozpouštěl v destilované vodě velmi pomalu a proto byla procedura použitá u přípravy roztoku Natrosolu opakována 2×. Označení a hustoty při 25°C použitých modelových kapalin jsou uvedeny v tabulce 2.

4.3.1 Obarvení kapalin

K vizualizaci proudění ve fluidní vrstvě byla použita metoda vstřikování a následného pozorování pohybu obarvené kapaliny. K obarvení roztoků maltózy a Natrosolu bylo použito potravinářské barvivo – E122 azorubin (obchodní název – červeň malinová). S roztokem Praestolu nebylo možné použít azorubin, protože roztok po přidavku tohoto barviva silně degradoval. Pro Praestol se proto použil acidobazický indikátor – červeň fenolová. Azorubin byl zakoupen jako směs azorubinu (4,6 hm.%) a NaCl, červeň fenolová jako čistá látka. Byly testovány různé

koncentrace barviv s ohledem na zachování stejných reologických vlastností roztoku a na druhé straně dostatečnou intenzitu zabarvení roztoku. Výsledné koncentrace jsou uvedeny v tabulce 3.

4.4 Měření reologických vlastností kapalin

Reologické vlastnosti kapalin (tokové křivky) byly měřeny pomocí rotačního reometru HAAKE RS 150 při teplotě, za které probíhala fluidace. Pro měření byl použit systém válec – válec Z 40 DIN Ti. Měření probíhalo v režimu řízení rychlosti deformace (CR mód) s dobou ustálení 5 sekund („kroková“ křivka). Měření bylo provedeno v rozsahu rychlostí deformace $0,01 - 1000 \text{ s}^{-1}$ ve 40 bodech s logaritmickou distribucí při 25°C .

4.5 Měření pádové rychlosti

Pádové rychlosti částic byly měřeny ve válcové koloně z plexiskla o vnitřním průměru 40 mm a délce 800 mm. Kolona byla opatřena ryskami po 100 mm a výpustí kapaliny ve spodní části kolony. Pro vlastní měření pádových rychlostí kulových částic se kolona naplnila fluidační kapalinou a zkontrolovala se její svislá poloha. Doba pádu kulové částice se měřila digitálními stopkami na dráze 500 mm (pro rychlé pády) nebo 100 mm (pro pomalé pády). Takto se určila doba pádu pro 10 částic a následně její průměrná hodnota.

4.6 Měření expanze vrstvy

Před začátkem měření průběhu fluidace se téměř do celé kolony napustila fluidační kapalina a nasypalo se předem odvážené množství pevných kulových částic (50 g) tak, aby vznikla vrstva o výšce přibližně 10–11 cm. Poté se kolonou nechalo protéci asi 5 l fluidační kapaliny, aby se fluidační zařízení odvzdušnilo.

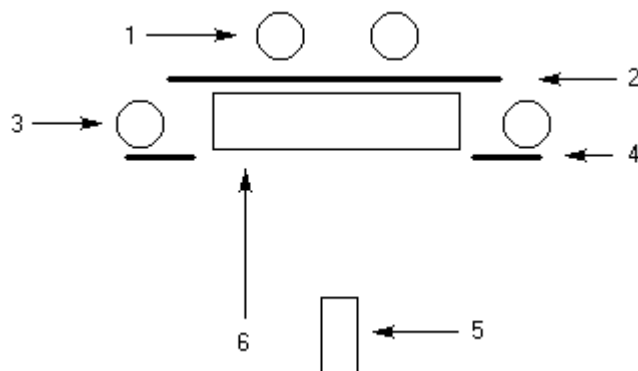
Měření expanze vrstev kulových částic bylo zahájeno měřením od minimálně nastavitelného průtoku hlavním čerpadlem {8} (obr. 4). Po ustálení mimovrstvové rychlosti, která byla zjištěna ze snímaných dat počítačem a zobrazena na displeji, byla odečtena průměrná výška expandované vrstvy a teplota fluidační kapaliny. Pak byl zvýšen průtok a postup se opakoval do maximálně možné hodnoty mimovrstvové rychlosti pro daný systém. Ta byla vymezena prahem úletu částic. Protože minimálně nastavitelný průtok čerpadla byl pro všechny modelové systémy nad prahem fluidace, využil se i tzv. bypass, který byl vestavěn do hlavice čerpadla a umožňoval ručně snižovat průtok fluidační kapaliny. Průtok byl takto snižován až bylo dosaženo prahu fluidace. Z každého měřeného systému kapalina–částice byla tímto způsobem získána data pro sestavení kalibrační křivky čerpadla a expanzní křivky pro daný systém. Kalibrační křivka čerpadla použitého pro čerpání obarvené kapaliny {14} byla zjištěna stejným postupem. Pro úsporu kapaliny se ke kalibraci použila čistá modelová kapalina bez barviva.

Po skončení měření byla fluidační kapalina vypuštěna ze zařízení i ze zásobníků. Do zásobníku pak byla nalita voda a zařízení se propláchno. Poté byla voda ze zařízení vypuštěna, kolona rozmontována v místě roštu a vyjmuty částice.

4.7 Videozáznam fluidace a vizualizace

Příprava pracovní scény v sobě zahrnovala kromě kontroly svislého ustavení fluidační kolony také rozsvícení světel (cca 20 min. před vlastními experimenty) a montáž videokamery na stativ. Rozmístění světel bylo voleno tak, aby osvětlení pracovní scény bylo homogenní. Byly testovány

různé kombinace rozmístění a počtu bočních a zadních světel. Nejlepší výsledky dávala kom-



Obrázek 5: Rozmístění světel – pohled shora

binace dvou zadních světel {1} za deskou z mléčného plexiskla {2} a dvou bočních světel {3} zacloněných proužkem kartónu {4} (obr. 5). Jako světla se použily rtuťové výbojky (zářivky) – zadní dlouhé 117 cm o příkonu 36 W, boční dlouhé 42 cm o příkonu 15 W. Obraz se snímá na mini-DV kameru MVX250i (výrobce Canon, CCD čip s 1,33 Mpixels, ukládané video v normě PAL – 25 snímků v rozlišení 768×576 za sekundu) {5} vzdálenou od kolony {6} přibližně 75 cm. Kamera byla umístěna na stativu, který byl propojen se šroubovitou otočnou hřídelí. Tato sestava umožňovala pohyb kamery ve vertikálním směru pomocí elektrického pohonu. Spínání a rychlost posunu se ovládala ručně.

Pro vlastní vizualizaci toku modelové kapaliny fluidní vrstvou byly testovány různé způsoby přidávání obarveného roztoku do proudu čiré modelové kapaliny. Jako nejvhodnější a nejméně ovlivňující průběh expanze fluidní vrstvy při vizualizaci toku kapaliny se ukázal způsob, při kterém byly nastaveny otáčky obou čerpadel pomocí kalibračních dat na stejnou mimovrstvovou rychlost a v činnosti bylo vždy jen jedno z čerpadel. Vlastní záznam vizualizace toku modelové kapaliny fluidní vrstvou probíhal tedy podle následujícího postupu. Po ustálení průtoku kapaliny, a tedy i fluidní vrstvy, se spustil záznam na kameře, vypnulo se hlavní čerpadlo a v téměř okamžiku zapnulo čerpadlo přečerpávající obarvený roztok. Tímto postupem byla zachována stejná výška fluidní vrstvy a přitom obarvená kapalina protékala celým průřezem kolony.

Z kalibračních dat bylo pro každý systém vybráno 4–7 mimovrstvových rychlostí u pro účely vizualizace toku kapaliny fluidní vrstvou. Výběr hodnot mimovrstvových rychlostí byl pro každý modelový systém individuální. Vybrané mimovrstvové rychlosti pro jednotlivé modelové systémy jsou vedeny v 14, 16, 18, 21, 23, 31.

Teplota, při které probíhaly experimenty, byla $25 \pm 1^\circ\text{C}$.

5 Vyhodnocení výsledků měření

Použité symboly pro označení systémů jsou uvedeny v tabulkách 1, 2 a 3. Systémy jsou značeny v pořadí částice–kapalina–barvivo–číslo záznamu. Pokud symbol pro barvivo je vynechán, jedná se o bezbarvý roztok. Při dané rychlosti kapaliny byly měřeny dva průchody obarveného roztoku vrstvou, ty jsou rozlišeny písmeny a , b za číslem záznamu. Výjimkou jsou systémy M-NA-A, kde byl pořízen jen jeden záznam.

5.1 Reologická data

Naměřené tokové křivky byly nahrazovány čtyřparametrovým Carreauovým modelem (6) a mocninovým modelem (5). Parametry modelů byly určeny minimalizací sumy kvadrátů relativních odchylek δ naměřených hodnot tečného napětí τ_{exp} a vypočítaných hodnot tečného napětí τ_{vyp} :

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

Parametry Carreauova modelu jednotlivých systémů jsou uvedeny v tabulce 4, mocninového modelu v tabulce 5.

5.2 Pádové rychlosti

Z průměrné doby pádu částice byla určena pádová rychlost pomocí vztahu:

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

kde l je délka měřeného úseku pádu a \bar{t} průměrná doba pádu. Pádové rychlosti byly poté korigovány na vliv stěn pomocí korekčního faktoru F_W , který je definován jako:

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

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

Pro roztok maltózy se pro výpočet 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 roztoky Natrosolu a Praestolu se použil vztah [51]:

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

kde Λ_t je určeno vztahem (35). Vztah je použitelný pro současně pseudoplastické a elastické kapaliny 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 a pádových rychlostí v neomezené kapalině lze nalézt v tabulkách 6 a 7.

5.3 Expanze fluidních vrstev

Ze zaznamenaných hodnot mimovrstvové rychlosti byla vypočtena hodnota bezrozměrné rychlosti u_b podle vztahu:

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

Dále byla vypočtena hodnota Reynoldsova kritéria Re pro newtonskou kapalinu (11) a Re_C pro neneutronskou kapalinu, které je definováno jako:

$$Re_C = \frac{du\rho}{\eta_0} \left(1 + \Lambda_t^2\right)^{\frac{1-m}{2}}. \quad (58)$$

Mezerovitost fluidní vrstvy ε byla vyhodnocena na základě znalosti její výšky h v průběhu fluidace, hmotnosti předložených částic m_s do fluidační kolony a rozměrů fluidační kolony a, b ze vztahu :

$$\varepsilon = \frac{hab - \frac{m_s}{\rho_s}}{hab}. \quad (59)$$

Výška fluidní vrstvy h byla určena na základě vizuálního odečtu pozice horního rozhraní čistá kapalina/fluidní vrstva během experimentu pomocí měřítka a ověřena při zpracovávání snímků pomocí metod analýzy obrazu. Hodnoty výšek, mezerovitostí, bezrozměrných a mimovrstvových rychlostí a příslušných Reynoldsových kritérií pro jednotlivé systémy jsou uvedeny v tabulkách 8 – 13. Závislosti $u_b = f(\varepsilon)$ byly vyneseny pro různé kapaliny v logaritmických souřadnicích jako expanzní křivky — obr. 9 a 10.

5.4 Zpracování a analýza obrazu

Po zaznamenání průběhu fluidace digitální videokamerou byl proveden přenos dat z videokazety miniDV do počítače přes rozhraní IEEE 1394. Poté byl záznam zkomprimován pomocí kodeku DivX 5.2.1 (<http://www.divx.com/divx/download/>). Následně byl zkomprimovaný záznam „vypálen“ na CD-R.

Výběr videosekvencí pro potřeby analýzy obrazu průběhů fluidace byl proveden pomocí volně dostupného (GNU General Public License) programu VirtualDub 1.6.4 (<http://www.virtualdub.org/>). Na videosekvenci se zde aplikoval deinterlační filtr a oříznutí okrajů (*Cropping*) po vnitřní okraje kolony. Poté byla videosekvence uložena jako statické obrázky ve formátu BMP.

K analýze obrazu byl použit program ImageJ 1.34k (<http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>). V ImageJ byla sekvence snímků otevřena pomocí příkazu *Import – Image Sequence*, který vytvoří z sekvence obrázků vícestránkový obrázek (Stack) ve formátu TIFF. Protože mimovrstvová rychlost byla v řádu jednotek až desítek $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$, byl tímto příkazem otevřen každý třetí, čtvrtý nebo pátý obrázek pomocí parametru *Increment* a počet snímků za sekundu poklesl na 5 až 8,333.

Dále byl zvýšen kontrast snímků příkazem *Enhance Contrast*. Tento příkaz provede ekvalizaci histogramu každého snímku (obrázek 6 a 7).

Z takto upravených snímků byly sledováním postupu čela obarveného roztoku pomocí pluginu *Manual Tracking* (<http://rsb.info.nih.gov/ij/plugins/manual-tracking.html>) experimentálně stanoveny rychlosti uvnitř fluidní vrstvy. Měření probíhalo tak, že na jednotlivých snímcích z vybrané videosekvence byly manuálně označeny pozice čela obarvené kapaliny. Ze změny souřadnic čela v závislosti na čase se poté vypočítala rychlost.



Obrázek 6: Vzhled snímku před (1) a po (2) provedení příkazu *Enhance Contrast*

5.4.1 Zónový model

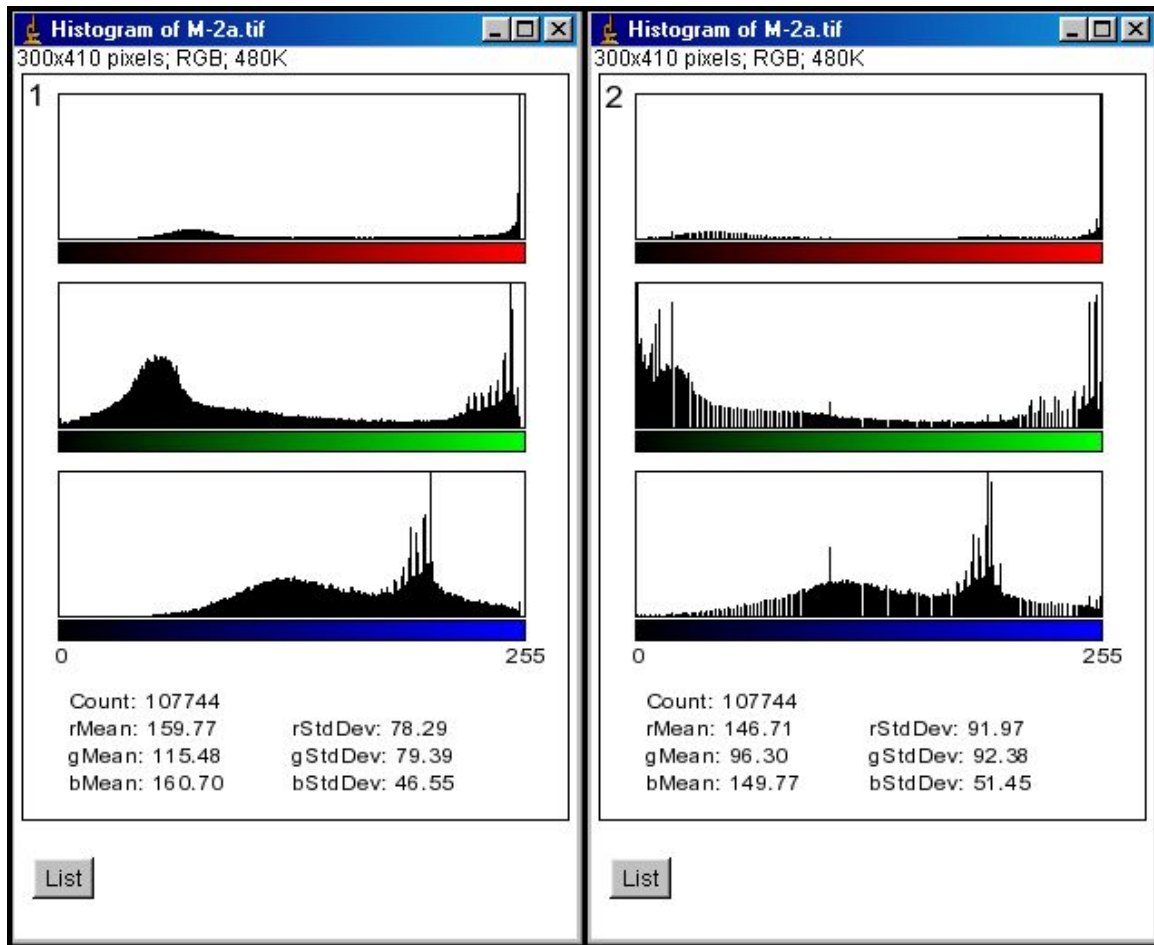
Pro newtonské roztoky Natrosolu a Praestolu byly experimentálně určené rychlosti v kanálcích porovnány s rychlostmi v kanálcích vypočtených za předpokladu platnosti zónového modelu - rovnice (45) až (49).

K výpočtu rychlosti uvnitř kanálek u_{ch} nebo v zóně částic u_1 pomocí zónového modelu bylo potřeba stanovit následující veličiny u , u_t , z , S_{ch} , S , ε , ε_1 a F_w .

Veličiny u , u_t a ε byly stanoveny v předcházejících výpočtech této práce na základě provedených experimentů expanze fluidní vrstvy.

Ke zjištění veličin S_{ch} a S byly použity metody analýzy obrazu aplikované na dané snímky průběhů fluidace. Ze snímků upravených předchozím postupem (viz výše) byl vybrán jeden snímek, kdy obarvený roztok vyplňoval celý objem kanálek, ale ještě příliš nepronikl do zóny s částicemi (tento okamžik zpravidla nastal, když se čelo obarveného roztoku dostalo mimo záběr kamery). Na tomto snímku byl napraňován obarvený roztok uvnitř kanálek pomocí pluginu *Threshold Color* (<http://www.dentistry.bham.ac.uk/landinig/software/software.html>) v režimu kódování barev HSB (Hue – odstín, Saturation – sytost, Brightness – jas).

Poté bylo kódování barev snímku převedeno na stupně šedi příkazem *8-bit*. Následně byla provedena měřítková kalibrace snímku pomocí operace *Set Scale*. Převodní poměr byl určen ze znalosti šířky vnitřku kolony v centimetrech (8 cm).



Obrázek 7: Histogram snímku před (1) a po (2) provedení příkazu *Enhance Contrast*

Dále byla ze snímku vybrána oblast o šířce kolony a odpovídající výšce fluidní vrstvy. Okolí této oblasti bylo vymazáno příkazem *Clear Outside*.

Šum byl potlačen pomocí filtru *Despeckle*. Pokud barvivo tvořilo větší plochy, byly příkazem *Outline* zobrazeny jen jejich okraje. Nástrojem *Wand* byl označen obarvený roztok uvnitř kanálků a jeho plocha A_{ch} změřena příkazem *Measure* s parametrem *Area*. Podělením plochou fluidní vrstvy A dostaneme poměr $\frac{A_{ch}}{A}$, pro který platí za předpokladu, že tloušťka a výška fluidní vrstvy se rovná tloušťce a výšce kanálků:

$$\frac{A_{ch}}{A} = \frac{A_{cht}}{At} = \frac{V_{ch}}{V} = \frac{S_{ch}h}{Sh} = \frac{S_{ch}}{S} \quad (60)$$

kde t je tloušťka fluidní vrstvy (kolony) a h výška expandující vrstvy částic. Takto byl stanoven poměr $\frac{S_{ch}}{S}$ pro výpočet ε_1 z rovnice (45). Hodnota korekčního faktoru F_W pro obdélníkovou kolonu byla vypočtena z rovnice [24]:

$$F_W = \frac{1}{1 + 1,778[1 - (1 - m)(2\Lambda_t)^{0,0211}] \left(\frac{d}{D_E}\right) + 0,488 \left(\frac{d}{D_E}\right)^2} \quad (61)$$

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

Na základě takto zjištěných dat se určil faktor f pomocí rovnice (49) a rychlosti v kanálcích u_{ch} z rovnice (45).

Hodnoty výšek, mezerovitostí, bezrozměrných a mimovrstvových rychlostí a příslušných Reynoldsových kritérií pro jednotlivé systémy při vizualizaci toku jsou uvedeny v tabulkách 18, 21, 23 a 31.

Pro roztoky Natrosolu jsou experimentálně stanovené rychlosti v kanálcích a plocha kanálek uvedeny v tabulkách 19 a 22, vypočtené parametry zónového modelu v tabulce 20. Na obrázcích 21–24 a 25–31 lze nalézt grafy kumulativních distribucí naměřených hodnot rychlostí, barevné snímky a tytéž snímky po provedených úpravách pro stanovení plochy kanálek.

Pro roztoky Praestolu jsou experimentálně stanovené rychlosti v kanálcích, plocha kanálek a faktory kroutivosti (tortuosity) uvedeny v tabulkách 24 a 32. Faktor kroutivosti q byl na základě trajektorie pohybu čela obarvené kapaliny spočítán podle rovnice:

$$q = \frac{l_e}{L} \quad (62)$$

kde l_e znamená naměřenou dráhu pohybu a L naměřenou dráhu pohybu ve svislém směru. Z faktorů kroutivosti jednotlivých kanálek byla do tabulky uvedena průměrná hodnota. Vypočtené parametry zónového modelu jsou v tabulkách 25 a 33. Na obrázcích 33–37 a 39–45 lze nalézt trajektorie pohybu čela obarvené kapaliny, barevné snímky a tytéž snímky po výše popsané úpravě pro stanovení plochy kanálek a s vyznačenými objekty — kanálky. Pod obrázky jsou tabulky 26–30 a 34–40 s popisem objektů — plochou, hlavní a vedlejší osou a úhlem sklonu proložené elipsy a Feretovým průměrem (nejdelší průmět). Morfologický popis objektů byl získán vybráním objektu nástrojem *Wand* a změřením příkazem *Measure* s parametry *Area*, *Fit Ellipse* a *Feret's Diameter*.

5.4.2 Mezerová rychlost

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

V tabulkách 15 a 17 jsou porovnány experimentálně určené rychlosti ve fluidní vrstvě (z pohybu čela obarvené kapaliny) s mezerovými rychlostmi vypočítanými podle rovnice (10). Hodnoty výšek, mezerovitostí, bezrozměrných a mimovrstvových rychlostí a příslušných Reynoldsových kritérií pro roztoky maltózy při vizualizaci toku kapaliny fluidní vrstvou jsou uvedeny v tabulkách 14 a 16. Na obrázcích 11–19 jsou uvedeny grafy kumulativních distribucí naměřených hodnot mezerových rychlostí, barevné snímky a tytéž snímky po provedených obrazových úpravách jako u roztoku Natrosolu a Praestolu (obr. 33–37, 39–45, 21–29).

6 Rozbor a diskuze výsledků

6.1 Experimentální zařízení

Vypracovaná metoda vizualizace byla náročná na synchronizaci při přepínání čerpadel. Při vyšších průtocích je na záznamech v okamžiku přepnutí patrné „trnutí“ fluidní vrstvy, které bylo způsobeno rychlým náběhem čerpadla za pomalejšího doběhu druhého čerpadla. 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 difúznímu vzhledu čela obarvené kapaliny.

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.

6.2 Expanze vrstev částic

Pro fluidace newtonským roztokem maltózy je fluidní vrstva přibližně rovnoměrná (obrázky 11–19). Pozorovatelné větší shluky a řetězení částic jsou místního charakteru a jsou způsobeny značným vlivem stěn zařízení. Závislost bezrozměrné rychlosti na mezerovitosti je lineární.

U slabě pseudoplastického a elastického roztoku Natrosolu se ve fluidní vrstvě objevují mírně zakřivené krátké kanálky, které náhodně vznikají a zanikají. Zároveň dochází k řetězení a tvorbě shluků částic ve větší míře než při fluidaci roztokem maltózy. Stejně hodnoty mezerovitosti je ve srovnání s roztokem maltózy dosaženo při vyšší mimovrstvové rychlosti. V porovnání s roztokem maltózy dochází k větší cirkulaci částic ve vrstvě.

U silně pseudoplastického a elastického roztoku Praestolu dochází k zřetelnému řetězení částic a ve vrstvě vzniká soustava mírně zakřivených kanálů. Ve srovnání s roztokem Natrosolu se vyskytují v menším počtu, ale s větším průřezem, probíhají přes celou výšku vrstvy a nemají tendenci zanikat. Dosažená míra expanze je velmi malá a prahu úletu bylo dosaženo při $u_B > 1$, hodnoty mezerovitosti jsou při stejných bezrozměrných rychlostech výrazně nižší než u maltózy nebo Natrosolu. K cirkulaci částic prakticky nedochází.

6.3 Vizualizace toku kapaliny fluidní vrstvou

Obarvením roztoku maltózy a Natrosolu potravinářským barvivem s obsahem azorubinu byly získány červeně zabarvené roztoky při zanedbatelné změně reologických vlastností (viz tabulka 4 a 5). Barevný odstup obarvených roztoků od modrých částic byl při použití azorubinu velký a prahování obarvené kapaliny jako objektu zájmu bylo snadné. Roztok Praestolu s fenolovou červení poskytoval fialově zabarvený roztok s mírnou změnou vlastností. Barevný odstup obarveného Praestolu od modrých částic byl dostatečný, a v kódování barev HSB histogram snímku odpovídal levému až prostřednímu histogramu na obrázku 3. K lepšímu oddělení částic od obarvené kapaliny by bylo vhodné nalézt červené barvivo.

Jiná situace nastala při prahování snímků s bezbarvými částicemi. Díky jejich průhlednosti bylo snažší sledovat pohyb čela obarvené kapaliny než u modrých částic a bylo dosaženo menších hodnot standartních odchylek σ měřených rychlostí kapaliny ve fluidní vrstvě. Na druhou stranu jejich průhlednost neumožnila oddělit prahováním částice obklopené obarvenou kapalinou a prahovaly se jako součást kapaliny. Díky tomu byla naměřená plocha, jejíž hodnota byla použita pro potřeby výpočtů parametrů zónového modelu, obarvené kapaliny větší.

Měření rychlosti pohybu čela proudu obarveného roztoku maltózy bylo komplikováno jeho značným rozmýváním, což dokazuje intenzivní sdílení hmoty ve vrstvě. Čelo proudu obarvené maltózy se pohybovalo relativně rovnoměrně stálou rychlostí se symetrickým rychlostním profilem ke středu kolony, kde byl menší vliv stěn a tedy rychlost mírně vyšší. Proto byl pohyb obarvené kapaliny sledován pouze ve svislém směru v asi $\frac{1}{4}$ šířky kolony a také z důvodu časové náročnosti proměření celého profilu v jednotlivých snímcích videozáznamu fluidace. Naměřené hodnoty mezerové rychlosti jsou větší než vypočtené hodnoty (relativní odchylky modrých částic od $-9,58\%$ do $-24,39\%$, bezbarvých částic od $-9,04\%$ do $-23,25\%$). Vyšší hodnoty odchylek byly pravděpodobně způsobeny obtékáním náhodně vzniklého většího shluku částic (např. obr. 15).

Při vizualizaci toku kapaliny při fluidaci roztokem Natrosolu bylo měření rychlosti pohybu čela obarvené kapaliny komplikováno také jeho relativně značným rozmýváním, které bylo ovšem menší než u fluidace roztokem maltózy. Čelo proudu obarveného roztoku Natrosolu se pohybovalo relativně rovnoměrně stálou rychlostí přes celou šířku kolony. Pohyb čela obarvené kapaliny byl proto sledován také pouze ve svislém směru v asi $\frac{1}{4}$ šířky kolony. Jednotlivé kanálky nebylo možné morfologicky popsat kvůli jejich velkému počtu a krátké době existence.

Naměřené hodnoty rychlostí při fluidaci roztokem Natrosolu s modrými částicemi se dobře shodují s rychlostmi v kanálcích určených ze zónového modelu (relativní odchylky od $3,23\%$ do $-16,57\%$). Odchytky rychlostí mají rostoucí trend s rostoucí výškou expandující fluidní vrstvy. Nárůst odchylek lze připsat změně transfokace při videozáznamu celé fluidní vrstvy na kameru, vlivem které se měnila kalibrace měřítka a se stoupající výškou fluidní vrstvy klesalo rozlišení objektů zájmu.

Pro systém M-NA-A-5 nebyla určena plocha kanálků a provedeny výpočty ze zónového modelu, protože nebylo možné zaznamenat na kameru fluidní vrstvu v jednom záběru v celé výšce (50 cm). Pro modré částice vychází poměr objemového průtoku kapaliny protékající kanálky k celkovému průtoku fluidní vrstvou v rozmezí 95% až 99% a roste se vzrůstající bezrozměrnou rychlostí, jejíž hodnota ležela v intervalu $u_b \in \langle 0,093; 0,328 \rangle$. Závislosti parametrů zónového modelu na bezrozměrné rychlosti jsou znázorněny graficky na obrázku 20.

U bezbarvých částic byly určeny rychlosti v kanálcích pouze experimentálně. Ze zónového modelu je nebylo možné spočítat ani v jednom případě, protože s ohledem na bezbarvost a průhlednost se částice jevily při průmětu 3D scény na 2D scénu jako součást obarveného roztoku Natrosolu (barva za částicemi). Z tohoto důvodu se nepodařilo oddělit částice od obarveného roztoku pomocí použitého algoritmu prahování. Na základě této skutečnosti byla plocha kanálků A_{ch} větší než odpovídá skutečnosti a následně mezerovitost v zóně s částicemi ε_1 nabývala hodnot, které neměly fyzikální smysl.

Čelo obarveného roztoku Praestolu bylo ostře ohraničené a dobře zřetelné, což umožnilo měření jeho trajektorie a rychlosti jeho pohybu. Stabilita a stálost kanálků umožnila jejich podrobnější morfologický popis. S rostoucí bezrozměrnou rychlostí klesá počet kanálků a roste jejich šířka. Z obrázků je patrná existence dvou oblastí v kanálku — dolní a horní, které byly pro zvýraznění ručně odděleny pomocí nástroje *Line* a příkazu *Clear* před provedením příkazu *Outline*. Dolní oblast je širší než horní a kapalina v ní proudí pomaleji (na grafech trajektorií je menší odstup bodů). Většinou má kónicky se zužující tvar ve směru toku kapaliny. Horní oblast je tvořena úzkým kanálkem s několikanásobně vyšší ($2\times$ až $3\times$) rychlostí kapaliny než v dolní oblasti (na grafech trajektorií je větší odstup bodů). Existence těchto dvou oblastí byla pravděpodobně způsobena ovlivněním toku neneutonské kapaliny průchodem skrze rošt (číslo {3} na obrázku 4). Za ním byla při vyšších rychlostech pozorována existence většího počtu vláken obarvené kapaliny vycházejících z distributoru a „slévajících“ se v horní části dolní oblasti do několika vláken (obr. 8). Tento jev umožnil sledování několika trajektorií čela

pohybu vláken obarvené kapaliny v jednom kanálku.



Obrázek 8: Barevné snímky ze systému B-PR-F-6b zachycující tvorbu většího počtu vláken obarvené kapaliny nad roštem

Naměřené hodnoty rychlostí v kanálcích při fluidaci s modrými částicemi se velmi dobře shodují s rychlostí v kanálcích vypočtenou ze zónového modelu (relativní odchylky od 3,41% do -4,76%). Pouze u prvního měření jsou odchylky vyšší (12,84% a 16,16%), protože obarvená kapalina protékala i vrstvou částic bez tvorby viditelného kanálku. Parametry zónového modelu jsou znázorněny též graficky na obrázku 32.

U bezbarvých částic jsou relativní odchylky rychlostí ze zónového modelu od naměřených vyšší (od -3,46% do -37,03%). Všechny jsou záporné, protože podobně jako u Natrosolu nebylo možné odprahovat částice obklopené bezbarvou kapalinou a plocha kanálků A_{ch} byla naměřena větší. Závislosti parametrů zónového modelu na bezrozměrné rychlosti jsou znázorněny graficky na obrázku 38.

Pro oba druhy částic vychází poměr objemového průtoku kapaliny protékající kanálky k celkovému průtoku fluidní vrstvou přibližně 98% nezávisle na bezrozměrné rychlosti, jejíž hodnota ležela v intervalu $u_b \in \langle 0,337; 0,832 \rangle$.

7 Závěr

Předložená diplomová práce se zabývá experimentálním studiem struktury a expanze vrstev fluidovanými newtonskými (vodný roztok maltózy) a neneutonskými (vodné roztoky polymerů) kapalinami v „dvourozměrné“ obdélníkové koloně. Byla vypracována metodika vizualizace toku kapalin fluidní vrstvou pomocí metody zbarvování proudu kapaliny vstupující do fluidační kolony.

Celkem byla proměřena expanze 6 systémů částice–kapalina při různých mimovrstvových rychlostech. Průběhy expanze modelových systémů a vizualizace toku kapaliny fluidní vrstvou byly zaznamenány digitální videokamerou. Vybrané videosekvence a snímky z videozáznamů byly vyhodnoceny pomocí metod analýzy obrazu. Pro zpracování videozáznamů a analýzu obrazu byly použity produkty VirtualDub a ImageJ, dostupné zdarma se zdrojovým kódem. Prokázalo se, že k účelům této práce to jsou vhodné aplikace.

Byly ověřeny a potvrzeny výsledky z předchozích prací, že se vzrůstajícími neneutonskými anomáliemi přechází 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 neneutonskými kapalinami použit jednoduchý zónový model. Byl vypracován postup pro stanovení parametrů zónového modelu pomocí veličin získaných z analýzy obrazu snímků pořízených z videozáznamů vizualizace toku kapaliny fluidní vrstvou částic. Na základě takto získaných parametrů zónového modelu se stanovil poměr objemového průtoku kapaliny protékající kanálky k celkovému průtoku fluidní vrstvou. Pro 0,8% roztok Praestolu vycházela hodnota tohoto poměru přibližně 98% nezávisle na bezrozměrné rychlosti. Pro 0,6% roztok Natrosolu v rozmezí 95% až 99% a hodnota poměru rostla se vzrůstající bezrozměrnou rychlostí. Pro newtonský 80% vodný roztok maltózy 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 24%).

V dalším výzkumu lze doporučit pro podrobnější studium uvedených jevů a ověření vhodnosti či rozšíření platnosti zónového modelu proměřením vícero různých systémů pevná částice–modelová kapalina, rozpracovat metodiku vizualizace toku kapalin fluidní vrstvou s využitím fotochromatických barviv a snížit časovou náročnost zpracování videosekvencí a statických snímků pomocí metod analýzy obrazu vytvořením vhodných maker v použitých softwarových produktech.

Literatura

- [1] Internetové stránky Eggescliffe – <http://www.eggescliffe.org.uk/physics/supercond/supfluid/superfluids.html>
encyklopedie Britannica – http://www.britannica.com/nobel/micro/573_62.html
encyklopedie Wikipedie – <http://cs.wikipedia.org/wiki/Helium>
- [2] Bird R. B., Armstrong R. C., Massenger O.: Dynamic of polymeric liquids, New York, 1977
- [3] Tanner R. I.: Engineering rheology, Clarenton press, Oxford, 1985
- [4] Beránek J., Sokol D.: Fluidní technika, SNTL, 1961
- [5] Davidson J. E., Harrison D.: Fluidization, Academic press London and New York
- [6] Novák V., Rieger F., Vavro K.: Hydraulické pochody v chemickém a potravinářském průmyslu, SNTL, 1989
- [7] Goroško V. D., Rozenbaum R. B., Todes O. M.: Izv. vuzov, Neft i gaz 1, 125, 1958
- [8] Hartman M., Coughlin R. W.: Collection of the Czechoslovakia Chemical Communications 58, 1213, 1993
- [9] Brea F. M., Edwarss M. F., Wilkinsin W. L.: Chemical Engineering Science 31, 329, 1976
- [10] Kawase Y., Ulbrecht J.: Chemical Engineering Science 36, 1193, 1981
- [11] Richardson J. F., Zaki W. N.: Trans. Inst. Chem Eng. 32, 35, 1994
- [12] Teichman R., Brokl P., Šiška B., Machač I.: 48th National Conference CHISA, Srní, 2001
- [13] Chhabra R. P.,Comiti J., Machač I.: Chemical Engineering Science 56, 1, 2001
- [14] Cicéron D., Comiti J., Chhabra R. P., Renaud M.: Chemical Engineering Science 57, 3225, 2002
- [15] Miura H., Takahashi T.,Ichikawa J., Kawase Y.: Powder Technology 117, 239, 2001
- [16] Ulbrichová I.: Kandidátská disertační práce, VŠCHT Pardubice, 1994
- [17] Machač I., Ulbrichová I.: 36th National Conference CHISA, Čeladná–Podolánky, 1994
- [18] Machač I., Balcar M., Lecjaks Z.: Chemical Engineering Science 41, 591, 1986
- [19] Balcar M.: Kandidátská disertační práce, VŠCHT Pardubice, 1984
- [20] Novotný Z.: Diplomová práce, VSČHT Pardubice, 1993
- [21] Machač I., Lecjaks Z.: Chemical Engineering Science 50, 143, 1995
- [22] Mikulášek P.: Kandidátská disertační práce, VŠCHT Pardubice, 1991
- [23] Machač I., Mikulášek P., Ulbrichová I.: Chemical Engineering Science 48, 2109, 1993

-
- [24] Machač I., Bena J., Šiška B.: 13th International Congress of Chemical and Processing Engineering CHISA, Praha, 1998
- [25] Gibilaro L. G.: Fluidization — Dynamics, Butterworth and Heinemann, Oxford, 2001
- [26] Wallis G. B.: One-dimensional two-phase flow, McGraw-Hill, New York, 1969
- [27] Foscolo P. U., Gibilaro L. G., Waldram S. P.: Chemical Engineering Science 38, 1251, 1983
- [28] Todes O., Citovic O. B.: Aparaty s kipjašćim zernistym slojem, Chimija Leningrad, 1981
- [29] Protodjakov I. O., Česnokov J. G.: Gidromechanika psevdožičennogo sloja, Chimija Leningrad, 1982
- [30] Machač I., Šiška B., Lecjaks Z., Bena J.: Chemical Engineering Science 52, 3409, 1997
- [31] Radoň P.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 1995
- [32] Novotná M.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 1993
- [33] Brokl P.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 2001
- [34] Bendová H.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 2002
- [35] Prichystal P.: Diplomová práce, Univerzita Pardubice, KCHI, 2004
- [36] Šiška B., Doleček P., Bendová H., Machač I.: 15th International Congress of Chemical and Processing Engineering CHISA, Praha, 2004
- [37] Smits A. J., Lim T. T.: Flow Visualization Techniques an Examples, Imperial College Press, 2000
- [38] Kurada S., Rankin G.W., Sridhar K.: Optics and Lasers in Engineering 20, 177, 1994
- [39] Kawaji M.: Nuclear Engineering and Design 184, 379, 1998
- [40] Cevey P. F., von Stockar U.: The Chemical Engineering Journal 31, 7, 1985
- [41] Funfschilling D., Li H. Z.: Chemical Engineering Science 56, 1137, 2001
- [42] Internetové stránky Dantec Dynamics –
<http://www.dantecmt.com/PIV/Princip/Index.html>
- [43] Muller J. S.: Korea-Australia Rheology Journal 14, 93, 2002
- [44] Durst F., Melling A., Whitelaw J.: Principles and Practices of Laser Doppler Anemometry, Academic Press, 1981
- [45] Internetové stránky Dantec Dynamics –
<http://www.dantecmt.com/lda/Princip/index.html>
- [46] Rao R. R., Mondy A. L., Baer A. T., Altobelli A. S., Stephens S. T.: Chemical Engineering Communacations 189, 1, 2002
-

- [47] Chaouki J., Larachi F., Dudukovi M. P.: Non-Invasive Monitoring of Multiphase Flows, Elsevier Science, 1996
- [48] Internetové stránky o Adobe Premiere Pro –
<http://www.amsoft.cz/produkty/adobe/premiere/pdf/DigitalVideoCZ.pdf>
- [49] Závodný T.: Bakalářská práce, Masarykova Univerzita, Fakulta Informatiky, Brno, 2002 –
<http://www.fi.muni.cz/%7Expavlov/xml/examples/bc3/bc3.html#d0e402>
- [50] Šonka M., Hlaváč V., Boyle R.: Image Processing, Analysis, and Machine Vision, PWS, 1998 – <http://www.icaen.uiowa.edu/~dip/LECTURE/lecture.html>
- [51] Chhabra R. P., Uhlherr P. H.: Can. J. Chem. Eng. 59, 771, 1981

Seznam tabulek

1	Charakteristika použitých částic	49
2	Charakteristika použitých kapalin	49
3	Charakteristika barviv	49
4	Parametry Carreaova modelu pro jednotlivé systémy	49
5	Parametry mocninového modelu pro jednotlivé systémy	50
6	Korekce na vliv stěn, pádové rychlosti v neomezené kapalině a Reynoldsova kritéria pro systémy s newtonskou kapalinou	50
7	Korekce na vliv stěn, pádové rychlosti v neomezené kapalině a Reynoldsova kritéria pro systémy s neneutronskou kapalinou	50
8	Experimentální data pro systém M-MA	51
9	Experimentální data pro systém B-MA	52
10	Experimentální data pro systém M-NA	53
11	Experimentální data pro systém B-NA	54
12	Experimentální data pro systém M-PR	55
13	Experimentální data pro systém B-PR	55
14	Experimentální data pro systémy M-MA-A	57
15	Porovnání naměřených a vypočtených mezerových rychlostí pro systémy M-MA-A	57
16	Experimentální data pro systémy B-MA-A	63
17	Porovnání naměřených a vypočtených mezerových rychlostí pro systémy B-MA-A	63
18	Experimentální data pro systémy M-NA-A	69
19	Data z analýzy obrazu pro systémy M-NA-A	69
20	Vypočtené parametry zónového modelu pro systémy M-NA-A	69
21	Experimentální data pro systémy B-NA-A	75
22	Data z analýzy obrazu pro systémy B-NA-A	75
23	Experimentální data pro systémy M-PR-F	83
24	Data z analýzy obrazu pro systémy M-PR-F	83
25	Vypočtené parametry zónového modelu pro systémy M-PR-F	83
26	Popis kanálků pro systém M-PR-F-1a	85
27	Popis kanálků pro systém M-PR-F-2a	86
28	Popis kanálků pro systém M-PR-F-3a	87
29	Popis kanálků pro systém M-PR-F-4b	88
30	Popis kanálků pro systém M-PR-F-5a	90
31	Experimentální data pro systémy B-PR-F	90
32	Data z analýzy obrazu pro systémy B-PR-F	91
33	Vypočtené parametry zónového modelu pro systémy B-PR-F	91
34	Popis kanálků pro systém B-PR-F-1a	93
35	Popis kanálků pro systém B-PR-F-2a	94
36	Popis kanálků pro systém B-PR-F-3a	95
37	Popis kanálků pro systém B-PR-F-4a	96
38	Popis kanálků pro systém B-PR-F-5b	97
39	Popis kanálků pro systém B-PR-F-6b	98
40	Popis kanálků pro systém B-PR-F-7b	99

Seznam obrázků

1	Zónový model	21
2	Dopplerův posun	24
3	Analýza histogramu algoritmem	29
4	Schéma fluidačního zařízení	30
5	Rozmístění světél – pohled shora	33
6	Vzhled snímku před (1) a po (2) provedení příkazu <i>Enhance Contrast</i>	36
7	Histogram snímku před (1) a po (2) provedení příkazu <i>Enhance Contrast</i>	37
8	Barevné snímky ze systému B-PR-F-6b zachycující tvorbu většího počtu vláken obarvené kapaliny nad roštem	41
9	Expanzní křivky systémů s částicemi M	56
10	Expanzní křivky systémů s částicemi B	58
11	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-MA-A-1b	59
12	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-MA-A-2b	60
13	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-MA-A-3a	61
14	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-MA-A-4a	62
15	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-1b	64
16	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-2b	65
17	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-3a	66
18	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-4a	67
19	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-5a	68
20	Graf závislosti f , ε_1 , ε a u_{ch}/u na u_b pro systém M-NA-A	70
21	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-NA-A-1	71
22	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-NA-A-2	72
23	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-NA-A-3	73
24	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-NA-A-4	74
25	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-1a	76
26	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-2b	77
27	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-3a	78
28	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-4a	79

29	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-5a	80
30	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-6a	81
31	Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-7a	82
32	Graf závislosti $f, \varepsilon_1, \varepsilon$ a u_{ch}/u na u_b pro systém M-PR-F	84
33	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-1a	85
34	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-2a	86
35	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-3a	87
36	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-4b	88
37	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-5a	89
38	Graf závislosti $f, \varepsilon_1, \varepsilon$ a u_{ch}/u na u_b pro systém B-PR-F	92
39	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-1a	93
40	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-2a	94
41	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-3a	95
42	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-4a	96
43	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-5b	97
44	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-6b	98
45	Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-7b	99

Příloha

Symbol	\bar{d} [mm]	σ [mm]	ρ_s [kg·m ⁻³]
M	3,940	0,095	2502
B	3,463	0,019	2811

Tabulka 1: Charakteristika použitých částic

Symbol	Kapalina	Výrobce	Koncentrace [hm. %]	ρ [kg·m ⁻³]
MA	Maltóza	Amylon	80	1323
NA	Natrosol	Hercules NV (Nizozemí)	0,6	1000
PR	Praestol	Chemische Fabrik Stockhausen GmbH	0,8	1001

Tabulka 2: Charakteristika použitých kapalin

Kapalina	Barvivo	Symbol	Výrobce	Koncentrace [hm. %]
Maltóza	Azorubin	A	AROCO, s.r.o.	0,1
Natrosol	Azorubin	A	AROCO, s.r.o.	0,1
Praestol	Červeň fenolová	F	LACHEMA, a.s.	0,02

Tabulka 3: Charakteristika barviv

Systém	η_0 [Pa·s]	η_∞ [Pa·s]	λ [s]	m	$\Delta\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]
M-PR	7,61	0,01	11,15	0,355	0,02 – 600
M-PR+F	6,65	0,01	8,48	0,346	0,02 – 600
B-PR	7,40	0,01	10,86	0,351	0,02 – 600
B-PR+F	6,48	0,01	8,09	0,337	0,02 – 600
M-NA	0,42	0	0,15	0,543	0,04 – 1000
M-NA+A	0,41	0	0,14	0,536	0,04 – 1000
B-NA	0,45	0	0,16	0,537	0,1 – 1000
B-NA+A	0,45	0	0,15	0,534	0,1 – 1000

Tabulka 4: Parametry Carreaova modelu pro jednotlivé systémy

Systém	K [Pa·s ⁿ]	n	$\Delta\dot{\gamma}$ [s ⁻¹]
M-PR	1,556	0,383	0,1 – 200
M-PR+F	1,566	0,373	0,1 – 200
B-PR	1,536	0,378	0,1 – 200
B-PR+F	1,565	0,373	0,1 – 200
M-NA	0,395	0,917	0,1 – 10
M-NA+A	0,395	0,923	0,1 – 10
B-NA	0,432	0,903	0,1 – 10
B-NA+A	0,424	0,911	0,1 – 10
M-MA	0,243	1	1 – 1000
M-MA+A	0,244	1	1 – 1000
B-MA	0,221	1	1 – 1000
B-MA+A	0,223	1	1 – 1000

Tabulka 5: Parametry mocninového modelu pro jednotlivé systémy

Systém	F_W	$u_{t\infty}$ [mm·s ⁻¹]	Re_t
M-MA	0,795	42,024	0,7152
B-MA	0,819	43,708	0,7418

Tabulka 6: Korekce na vliv stěn, pádové rychlosti v neomezené kapalině a Reynoldsova kritéria pro systémy s newtonskou kapalinou

Systém	F_W	$u_{t\infty}$ [mm·s ⁻¹]	Re_{tC}
M-PR	0,893	12,386	$5,286 \cdot 10^{-2}$
B-PR	0,906	12,230	$5,199 \cdot 10^{-2}$
M-NA	0,864	39,671	0,4082
B-NA	0,879	33,430	0,2877

Tabulka 7: Korekce na vliv stěn, pádové rychlosti v neomezené kapalině a Reynoldsova kritéria pro systémy s neneutronskou kapalinou

h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re
11	0,545	0	0	0
12,5	0,600	0,052	2,2	0,047
15	0,667	0,071	3	0,064
16,5	0,697	0,086	3,6	0,077
19	0,737	0,102	4,3	0,092
21	0,762	0,112	4,7	0,101
24	0,792	0,126	5,3	0,113
27	0,815	0,142	5,98	0,128
30,5	0,836	0,159	6,7	0,143
34	0,853	0,175	7,36	0,158
38,5	0,870	0,190	8	0,171
44	0,886	0,207	8,7	0,186
46	0,891	0,218	9,15	0,196
57	0,912	0,232	9,75	0,209
66	0,924	0,247	10,4	0,223

Tabulka 8: Experimentální data pro systém M-MA

h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re
10	0,555	0	0	0
11,7	0,620	0,067	2,93	$6,070 \cdot 10^{-2}$
13	0,658	0,081	3,56	$7,375 \cdot 10^{-2}$
14,5	0,693	0,098	4,3	$8,908 \cdot 10^{-2}$
16,5	0,730	0,116	5,08	0,1052
18,5	0,760	0,129	5,63	0,1166
20,5	0,783	0,142	6,19	0,1282
23	0,807	0,156	6,8	0,1409
25,5	0,826	0,173	7,55	0,1564
28	0,841	0,189	8,25	0,1709
30,5	0,854	0,198	8,65	0,1792
35	0,873	0,213	9,3	0,1927
38,5	0,884	0,231	10,1	0,2092
44	0,899	0,245	10,7	0,2217
49,5	0,910	0,254	11,1	0,2300
60	0,926	0,275	12	0,2486

Tabulka 9: Experimentální data pro systém B-MA

h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re_C
11	0,545	0	0	0
13	0,615	0,058	2,3	$2,741 \cdot 10^{-2}$
13,5	0,630	0,068	2,7	$3,217 \cdot 10^{-2}$
14,3	0,650	0,076	3	$3,575 \cdot 10^{-2}$
15,6	0,679	0,087	3,45	$4,111 \cdot 10^{-2}$
16,3	0,693	0,097	3,84	$4,576 \cdot 10^{-2}$
17,5	0,714	0,102	4,05	$4,826 \cdot 10^{-2}$
18,5	0,730	0,115	4,57	$5,445 \cdot 10^{-2}$
20,1	0,751	0,127	5,05	$6,017 \cdot 10^{-2}$
23,5	0,787	0,157	6,22	$7,411 \cdot 10^{-2}$
26,8	0,813	0,187	7,43	$8,853 \cdot 10^{-2}$
30,5	0,836	0,217	8,6	0,1025
37,5	0,867	0,251	9,97	0,1188
44,5	0,888	0,280	11,1	0,1323
49,5	0,899	0,313	12,4	0,1478
67	0,925	0,343	13,6	0,1621

Tabulka 10: Experimentální data pro systém M-NA

h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re_C
10,5	0,576	0	0	0
12	0,629	0,090	3	$2,935 \cdot 10^{-2}$
13,5	0,670	0,108	3,6	$3,522 \cdot 10^{-2}$
14,5	0,693	0,124	4,15	$4,060 \cdot 10^{-2}$
16	0,722	0,145	4,85	$4,745 \cdot 10^{-2}$
17	0,738	0,160	5,35	$5,234 \cdot 10^{-2}$
17,5	0,746	0,173	5,8	$5,674 \cdot 10^{-2}$
19,5	0,772	0,197	6,6	$6,457 \cdot 10^{-2}$
20,5	0,783	0,218	7,3	$7,142 \cdot 10^{-2}$
22,5	0,802	0,250	8,35	$8,169 \cdot 10^{-2}$
25,5	0,825	0,285	9,54	$9,334 \cdot 10^{-2}$
28	0,841	0,308	10,3	0,1008
31,5	0,859	0,338	11,3	0,1106
34	0,869	0,356	11,9	0,1164
40	0,889	0,389	13	0,1272
49	0,909	0,431	14,4	0,1409

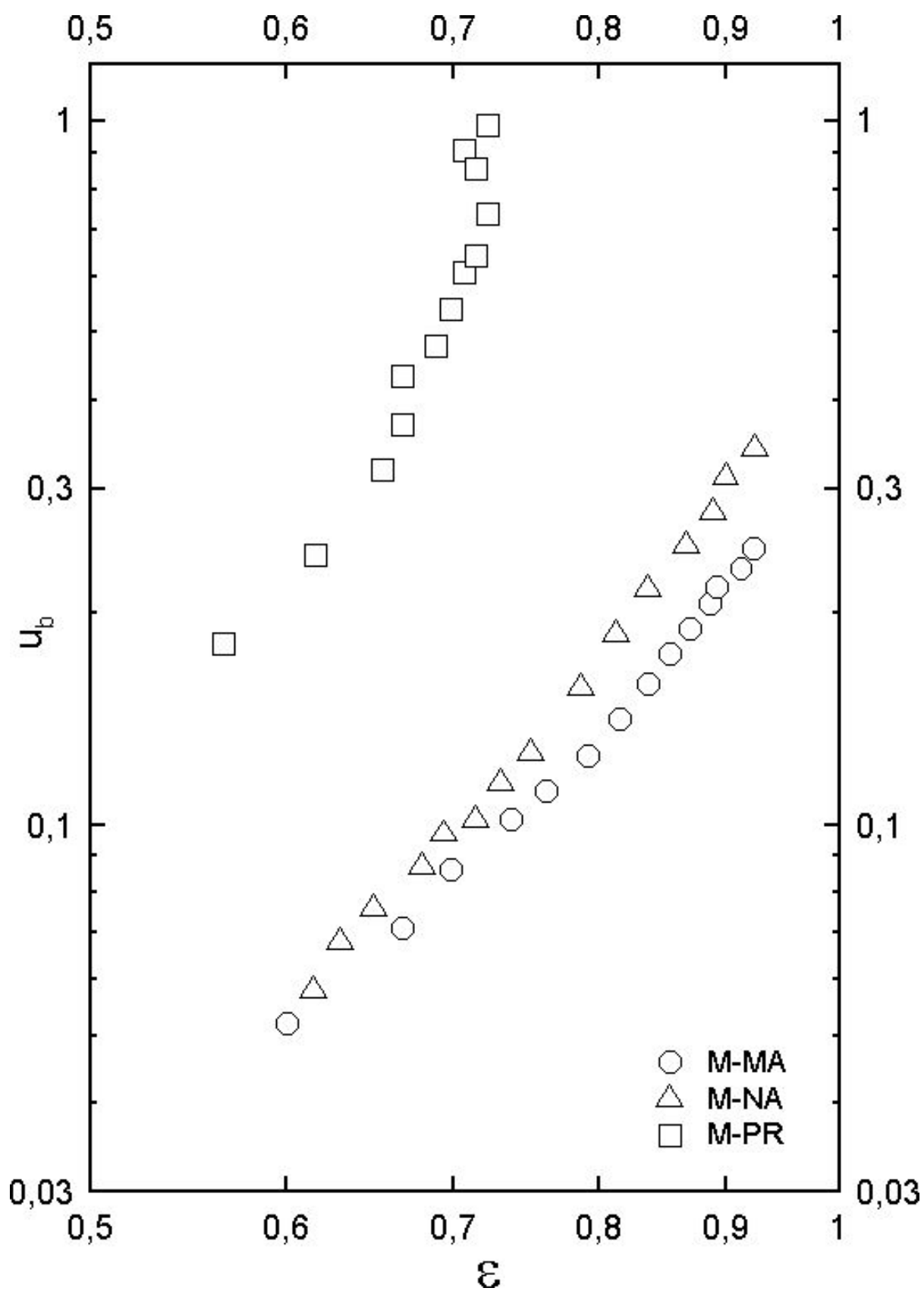
Tabulka 11: Experimentální data pro systém B-NA

h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re_C
11	0,546	0	0	0
11,5	0,565	0,181	2,24	$1,071 \cdot 10^{-2}$
13	0,616	0,242	3	$1,434 \cdot 10^{-2}$
14,5	0,655	0,320	3,96	$1,892 \cdot 10^{-2}$
15	0,667	0,371	4,6	$2,198 \cdot 10^{-2}$
15	0,667	0,434	5,37	$2,566 \cdot 10^{-2}$
16	0,688	0,480	5,95	$2,844 \cdot 10^{-2}$
16,5	0,697	0,541	6,7	$3,202 \cdot 10^{-2}$
17	0,706	0,609	7,54	$3,603 \cdot 10^{-2}$
17,5	0,714	0,643	7,97	$3,809 \cdot 10^{-2}$
18	0,722	0,740	9,17	$4,382 \cdot 10^{-2}$
17,5	0,714	0,856	10,6	$5,066 \cdot 10^{-2}$
17	0,706	0,912	11,3	$5,400 \cdot 10^{-2}$
18	0,722	0,985	12,2	$5,830 \cdot 10^{-2}$

Tabulka 12: Experimentální data pro systém M-PR

h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re_C
10	0,555	0	0	0
11,5	0,613	0,222	2,72	$1,276 \cdot 10^{-2}$
11,5	0,613	0,274	3,35	$1,572 \cdot 10^{-2}$
12,5	0,644	0,361	4,42	$2,074 \cdot 10^{-2}$
13	0,658	0,433	5,3	$2,487 \cdot 10^{-2}$
13,5	0,671	0,495	6,05	$2,839 \cdot 10^{-2}$
13,5	0,671	0,560	6,85	$3,214 \cdot 10^{-2}$
14	0,682	0,613	7,5	$3,519 \cdot 10^{-2}$
15	0,704	0,689	8,43	$3,955 \cdot 10^{-2}$
14	0,682	0,756	9,24	$4,335 \cdot 10^{-2}$
14	0,682	0,859	10,5	$4,926 \cdot 10^{-2}$
15	0,704	0,908	11,1	$5,208 \cdot 10^{-2}$
15	0,704	1,014	12,4	$5,818 \cdot 10^{-2}$
15,5	0,713	1,063	13	$6,099 \cdot 10^{-2}$
16	0,722	1,169	14,3	$6,709 \cdot 10^{-2}$

Tabulka 13: Experimentální data pro systém B-PR



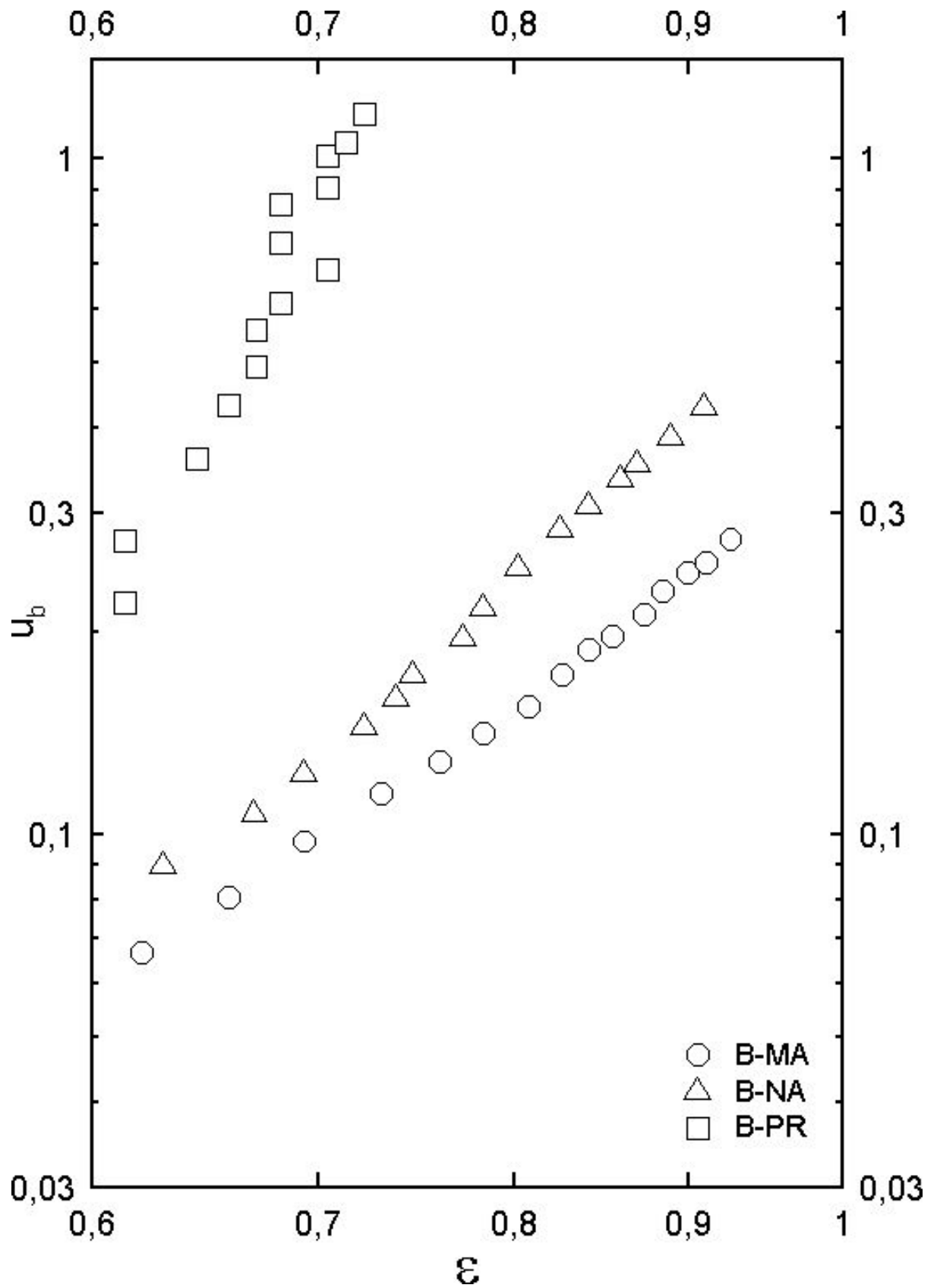
Obrázek 9: Expanzní křivky systémů s částicemi M

Systém	h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re
M-MA-A-1	18,5	0,730	0,090	3,8	$8,140 \cdot 10^{-2}$
M-MA-A-2	26,5	0,811	0,155	6,5	0,1392
M-MA-A-3	32,5	0,846	0,176	7,4	0,1585
M-MA-A-4	39	0,872	0,202	8,5	0,1820

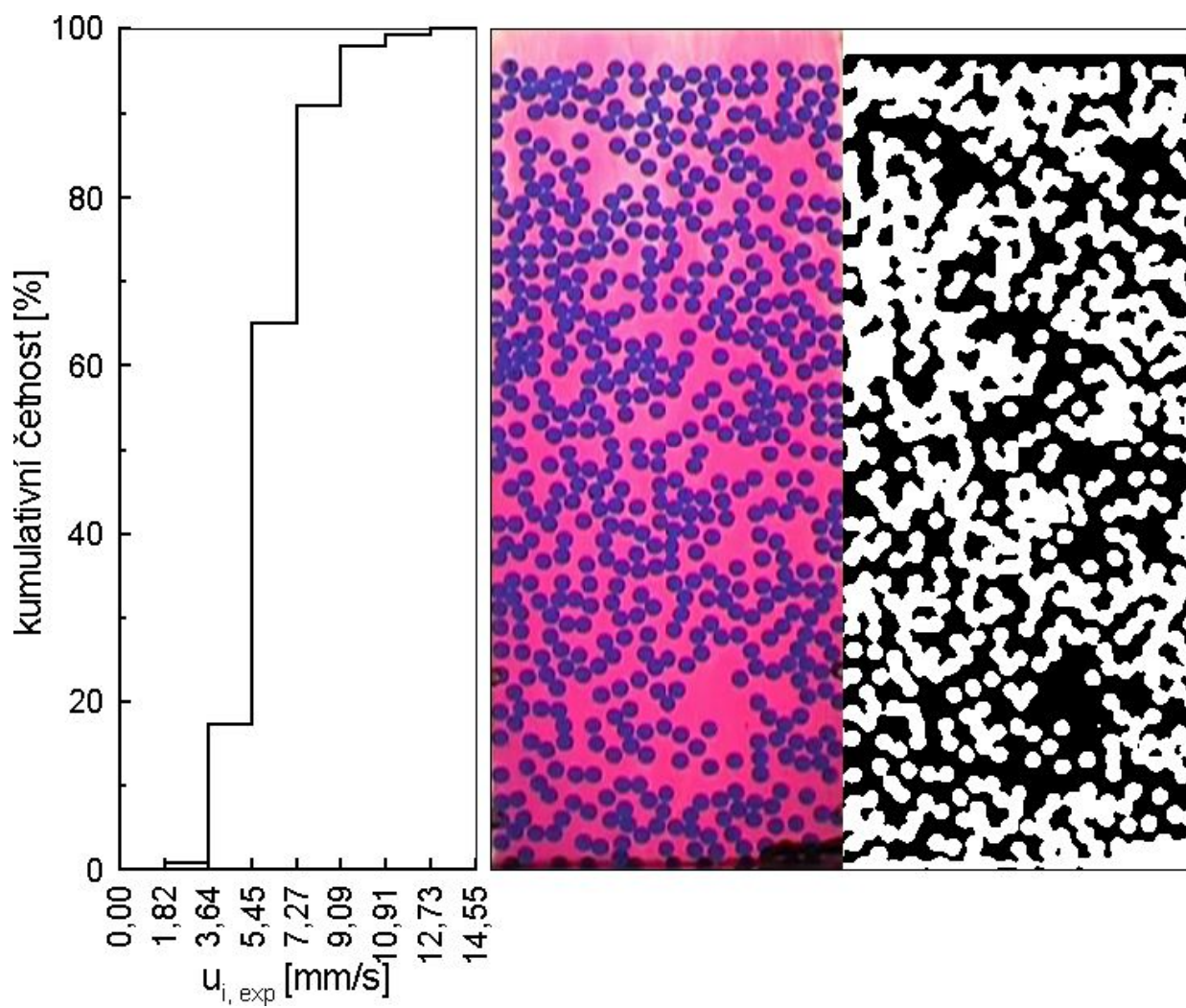
Tabulka 14: Experimentální data pro systémy M-MA-A

Systém	$u_{i,exp}$ [mm·s ⁻¹]	σ [mm·s ⁻¹]	$u_{i,vyp}$ [mm·s ⁻¹]	δ
M-MA-A-1a	6,2540	2,3240	5,2073	-16,74%
M-MA-A-1b	5,9758	1,7211	5,2073	-12,86%
M-MA-A-2a	10,5960	3,0653	8,0115	-24,39%
M-MA-A-2b	8,8599	2,5613	8,0115	-9,58%
M-MA-A-3a	10,4126	3,8176	8,7453	-16,01%
M-MA-A-3b	10,5285	3,3155	8,7453	-16,94%
M-MA-A-4a	11,5330	3,5717	9,7499	-15,46%
M-MA-A-4b	11,3459	3,7160	9,7499	-14,07%

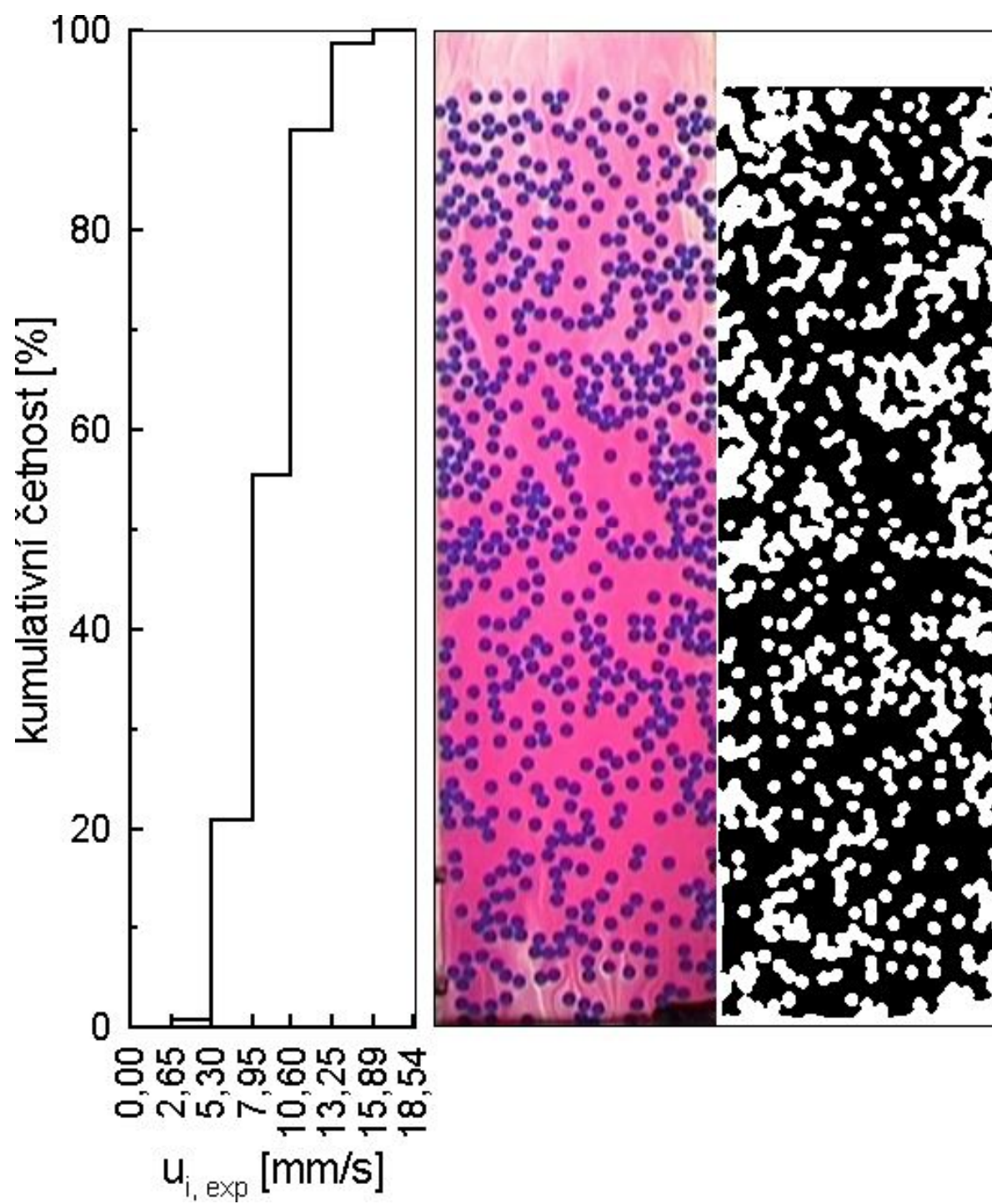
Tabulka 15: Porovnání naměřených a vypočtených mezerových rychlostí pro systémy M-MA-A



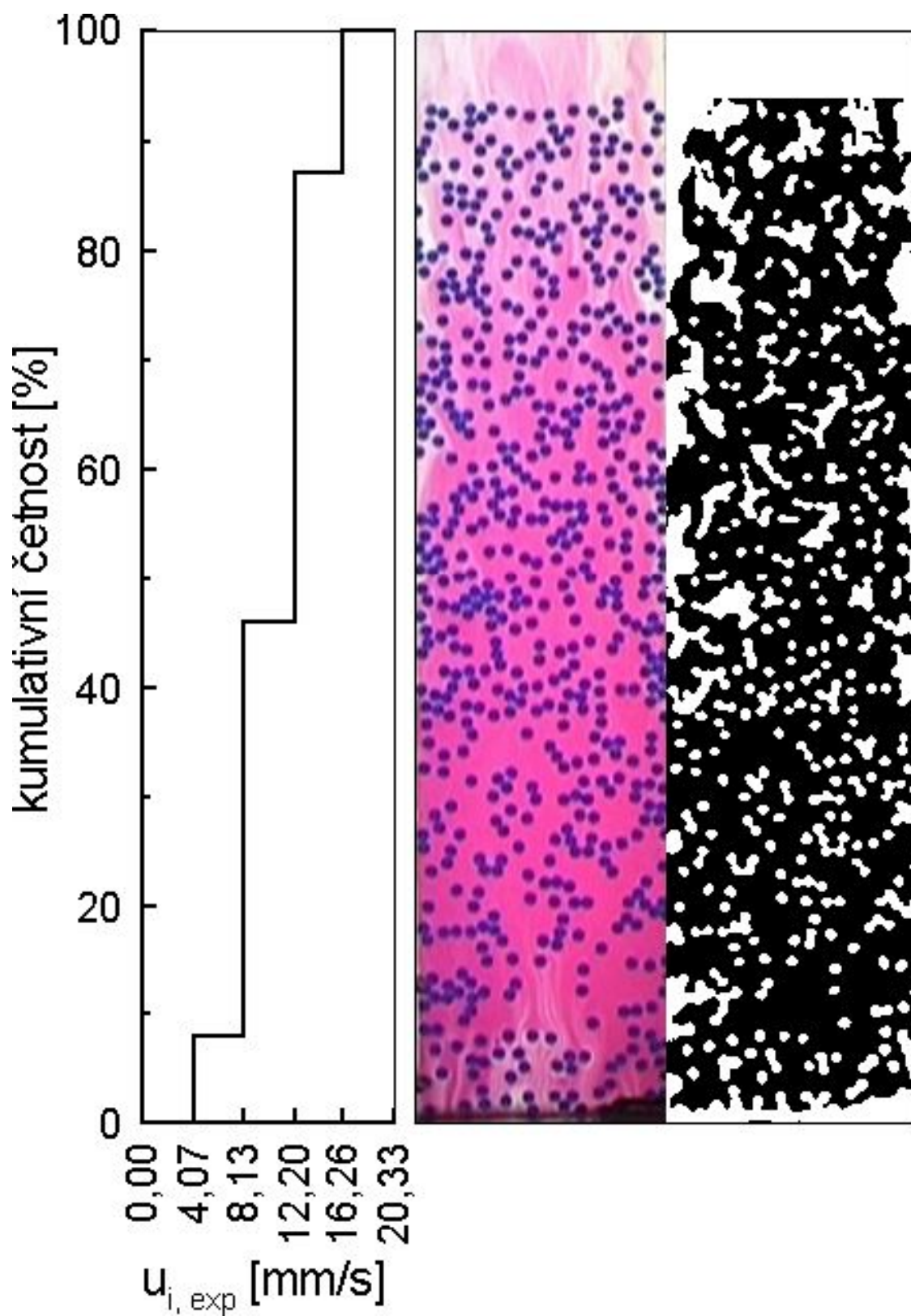
Obrázek 10: Expanzní křivky systémů s částicemi B



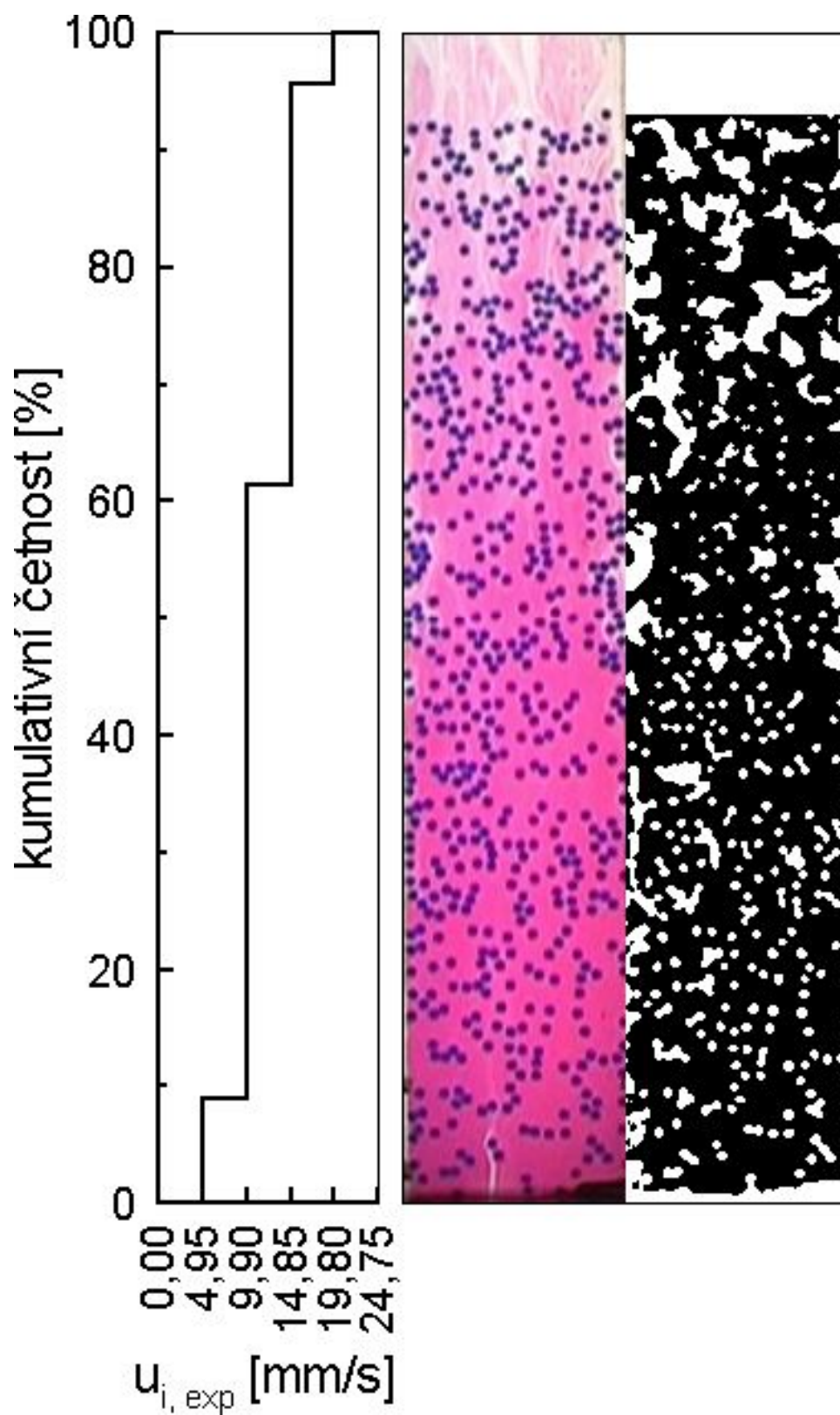
Obrázek 11: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-MA-A-1b



Obrázek 12: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-MA-A-2b



Obrázek 13: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-MA-A-3a



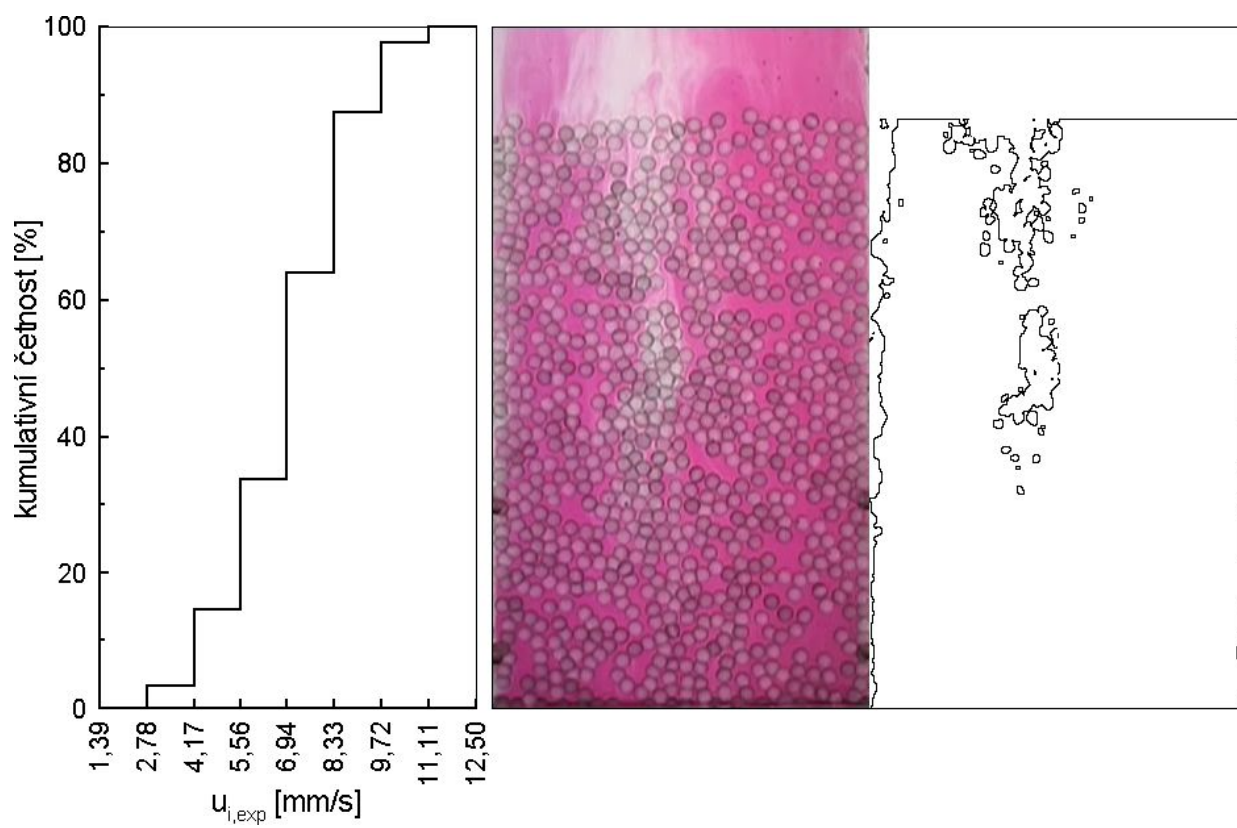
Obrázek 14: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-MA-A-4a

Systém	h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re
B-MA-A-1	12,5	0,644	0,082	3,6	$7,458 \cdot 10^{-2}$
B-MA-A-2	15,5	0,713	0,110	4,8	$9,944 \cdot 10^{-2}$
B-MA-A-3	19	0,766	0,137	6	0,1243
B-MA-A-4	22,5	0,802	0,177	7,74	0,1604
B-MA-A-5	28	0,841	0,199	8,7	0,1802

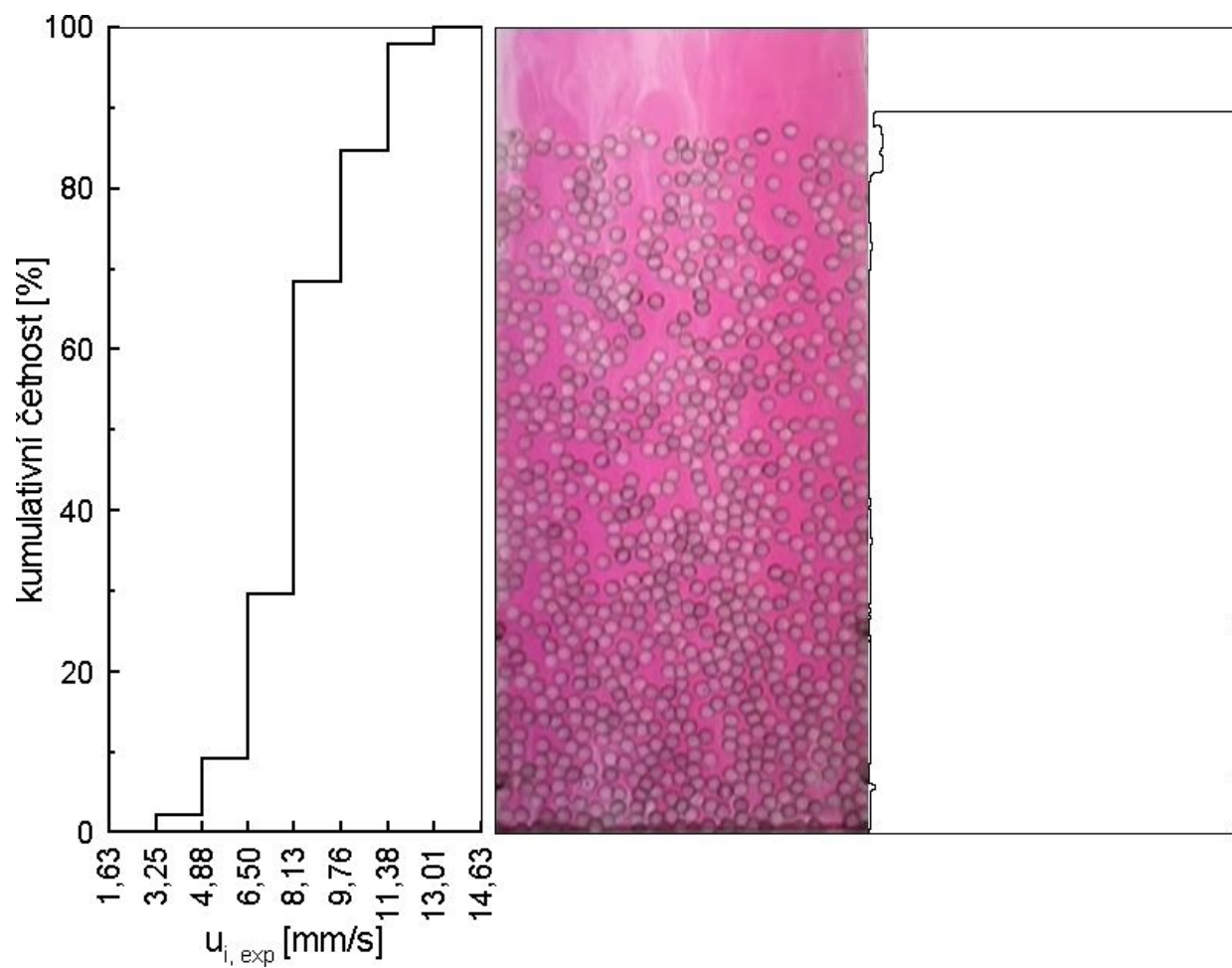
Tabulka 16: Experimentální data pro systémy B-MA-A

Systém	$u_{i,exp}$ [mm·s ⁻¹]	σ [mm·s ⁻¹]	$u_{i,vyp}$ [mm·s ⁻¹]	δ
B-MA-A-1a	6,1448	1,5884	5,5891	-9,04%
B-MA-A-1b	6,9288	1,8668	5,5891	-19,34%
B-MA-A-2a	7,9494	1,8421	6,7322	-15,31%
B-MA-A-2b	8,2628	2,0311	6,7322	-18,52%
B-MA-A-3a	10,0485	2,6967	7,8343	-22,03%
B-MA-A-3b	9,4409	2,2600	7,8343	-17,02%
B-MA-A-4a	11,5802	3,4542	9,6474	-16,69%
B-MA-A-4b	11,6946	3,2325	9,6474	-17,51%
B-MA-A-5a	13,4758	4,2776	10,3433	-23,25%
B-MA-A-5b	13,3858	4,1710	10,3433	-22,73%

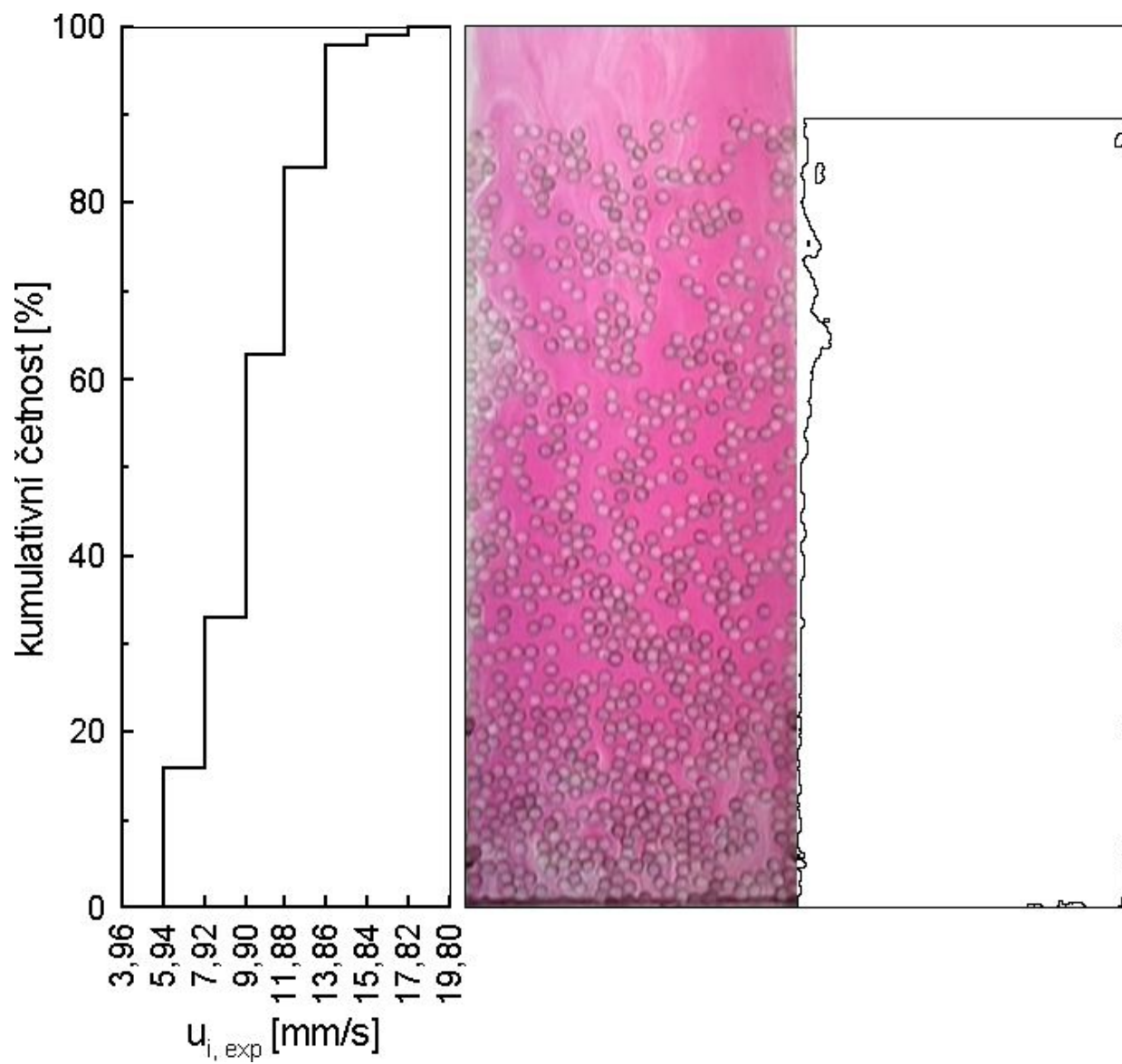
Tabulka 17: Porovnání naměřených a vypočtených mezerových rychlostí pro systémy B-MA-A



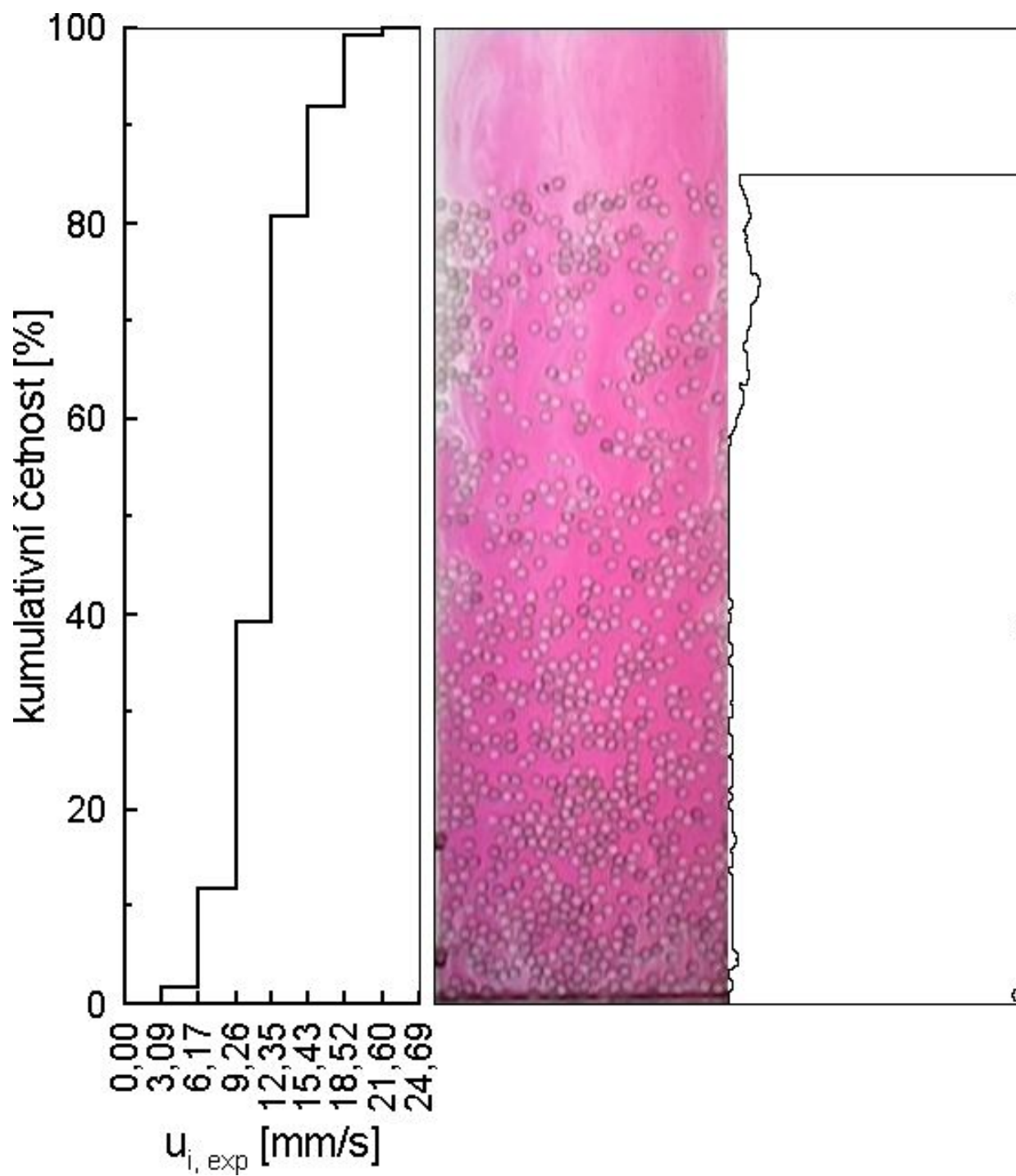
Obrázek 15: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-1b



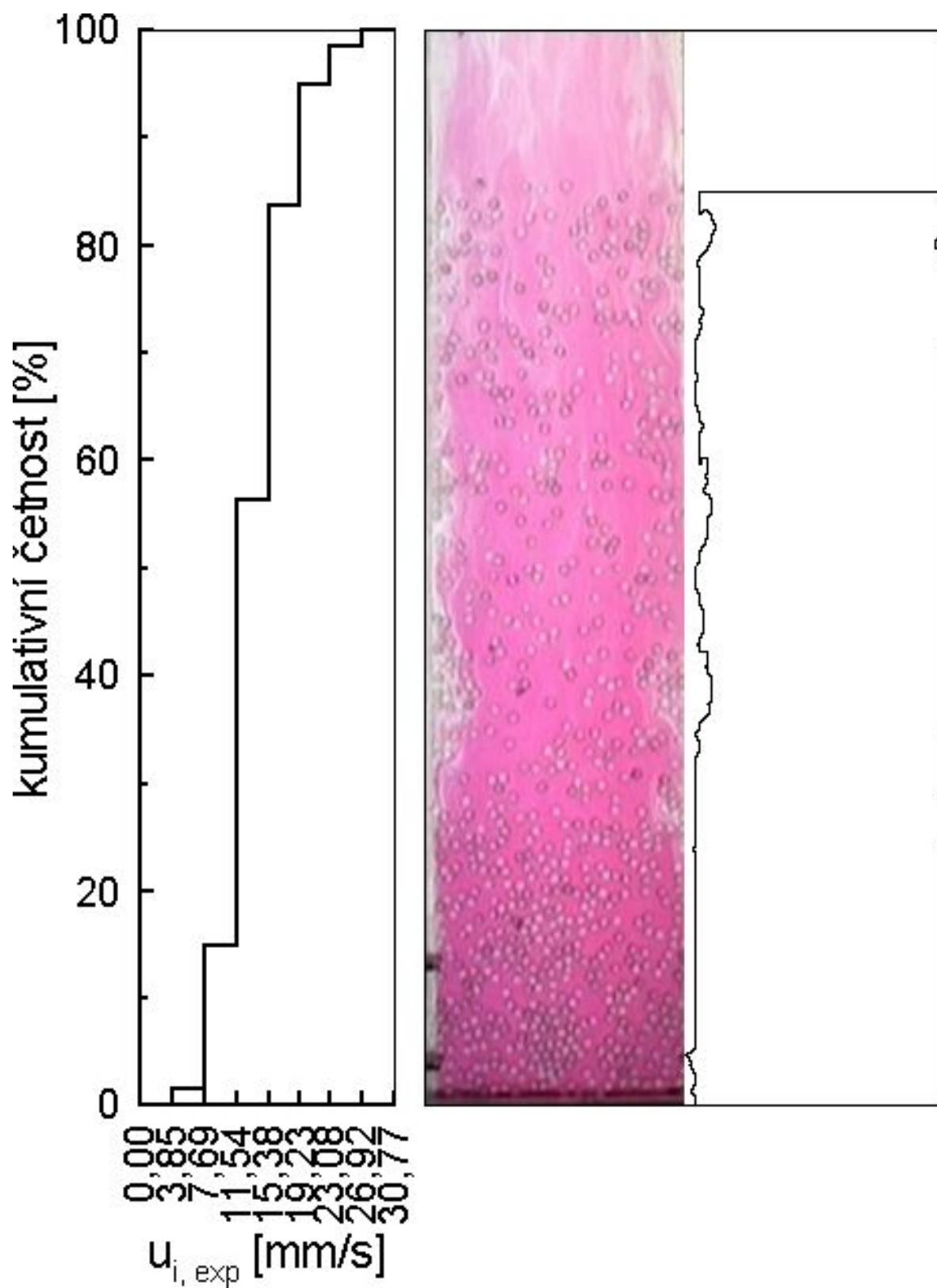
Obrázek 16: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-2b



Obrázek 17: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-3a



Obrázek 18: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-4a



Obrázek 19: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-MA-A-5a

Systém	h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re_C
M-NA-A-1	16	0,687	0,093	3,7	$4,409 \cdot 10^{-2}$
M-NA-A-2	18,5	0,730	0,124	4,9	$5,839 \cdot 10^{-2}$
M-NA-A-3	27,5	0,818	0,214	8,5	0,1013
M-NA-A-4	41,5	0,879	0,302	12	0,1430
M-NA-A-5	50	0,900	0,328	13	0,1549

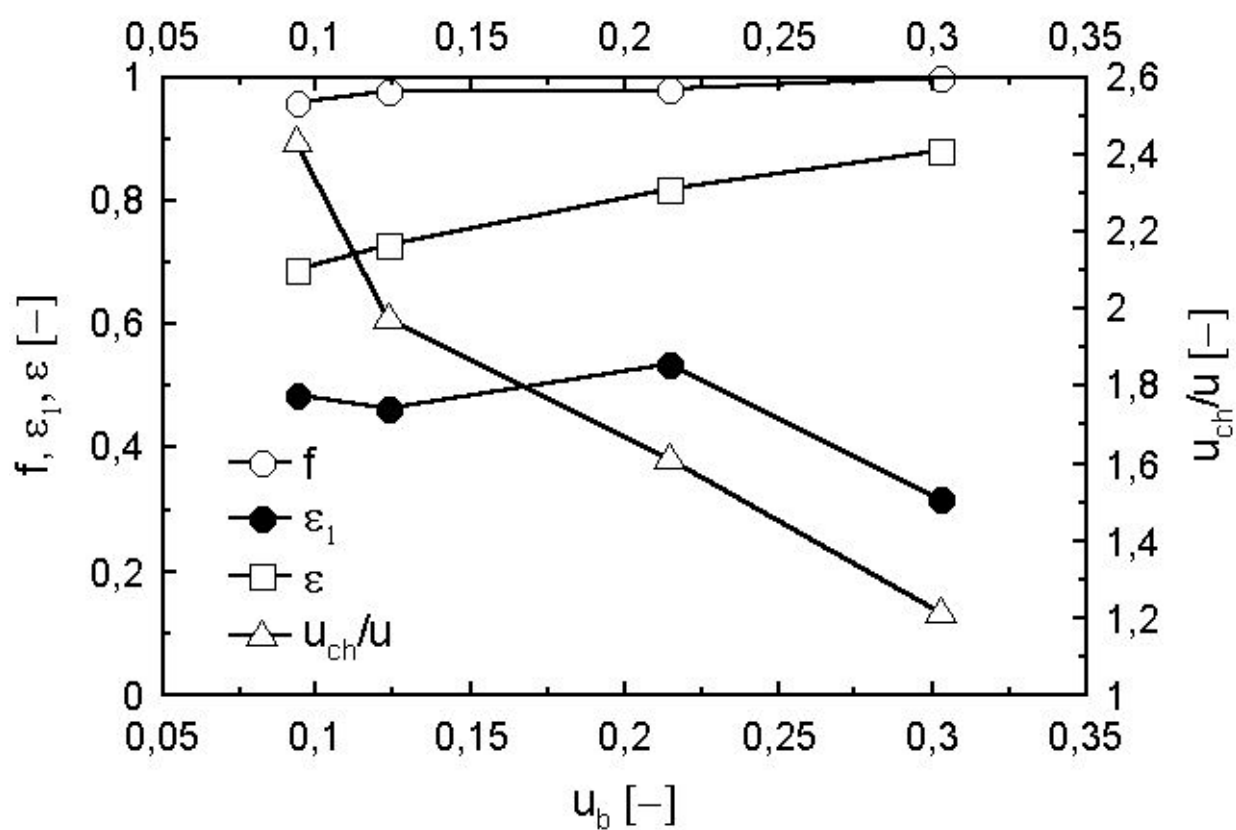
Tabulka 18: Experimentální data pro systémy M-NA-A

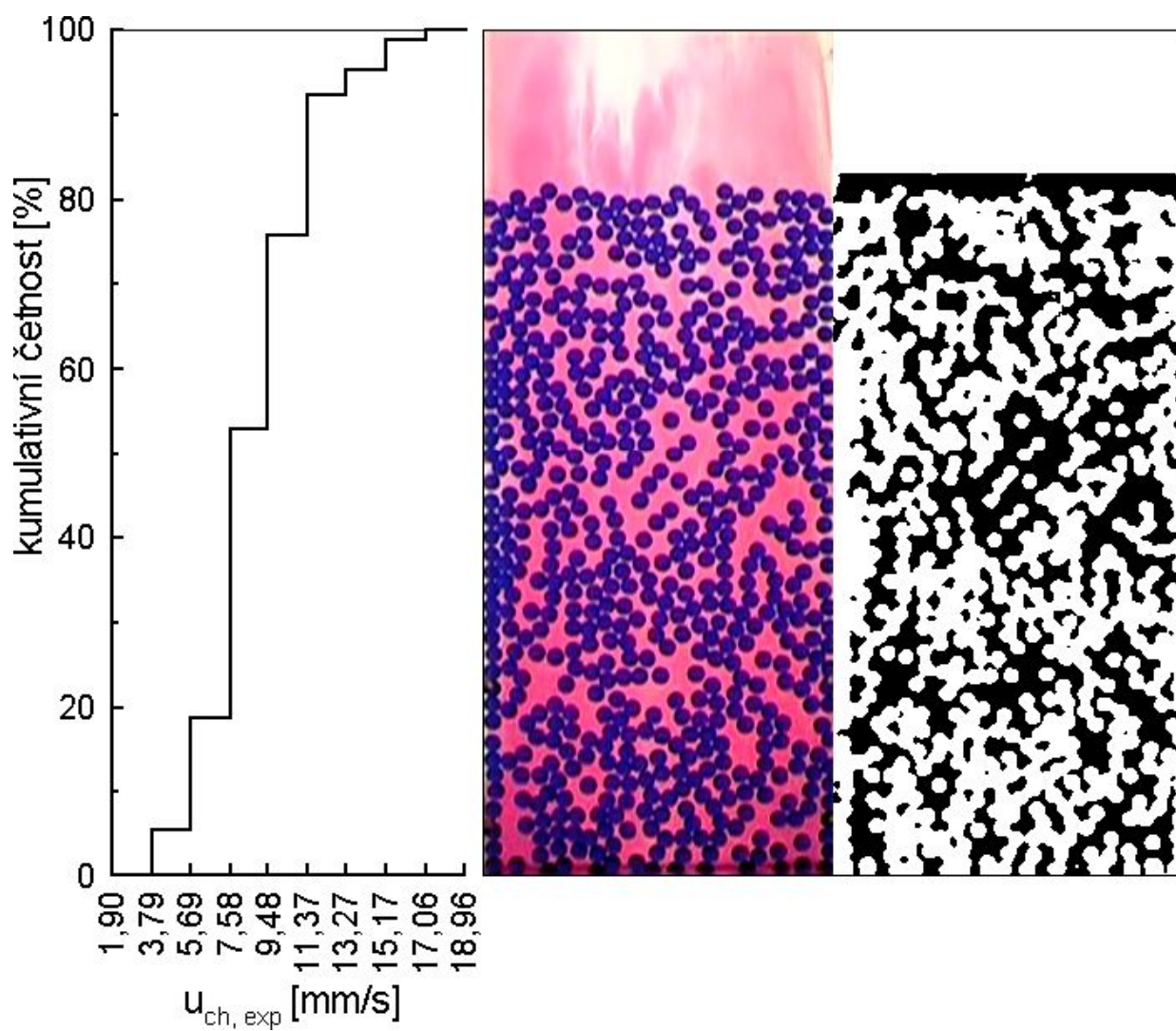
Systém	$u_{ch,exp}$ [mm·s ⁻¹]	σ [mm·s ⁻¹]	A_{ch} [cm ²]
M-NA-A-1	8,7315	2,6833	50,3075
M-NA-A-2	10,4451	2,7672	73,1957
M-NA-A-3	15,1215	5,5811	134,0507
M-NA-A-4	17,4672	6,5390	273,2406
M-NA-A-5a	20,2662	7,4328	—
M-NA-A-5b	21,2074	6,6268	—

Tabulka 19: Data z analýzy obrazu pro systémy M-NA-A

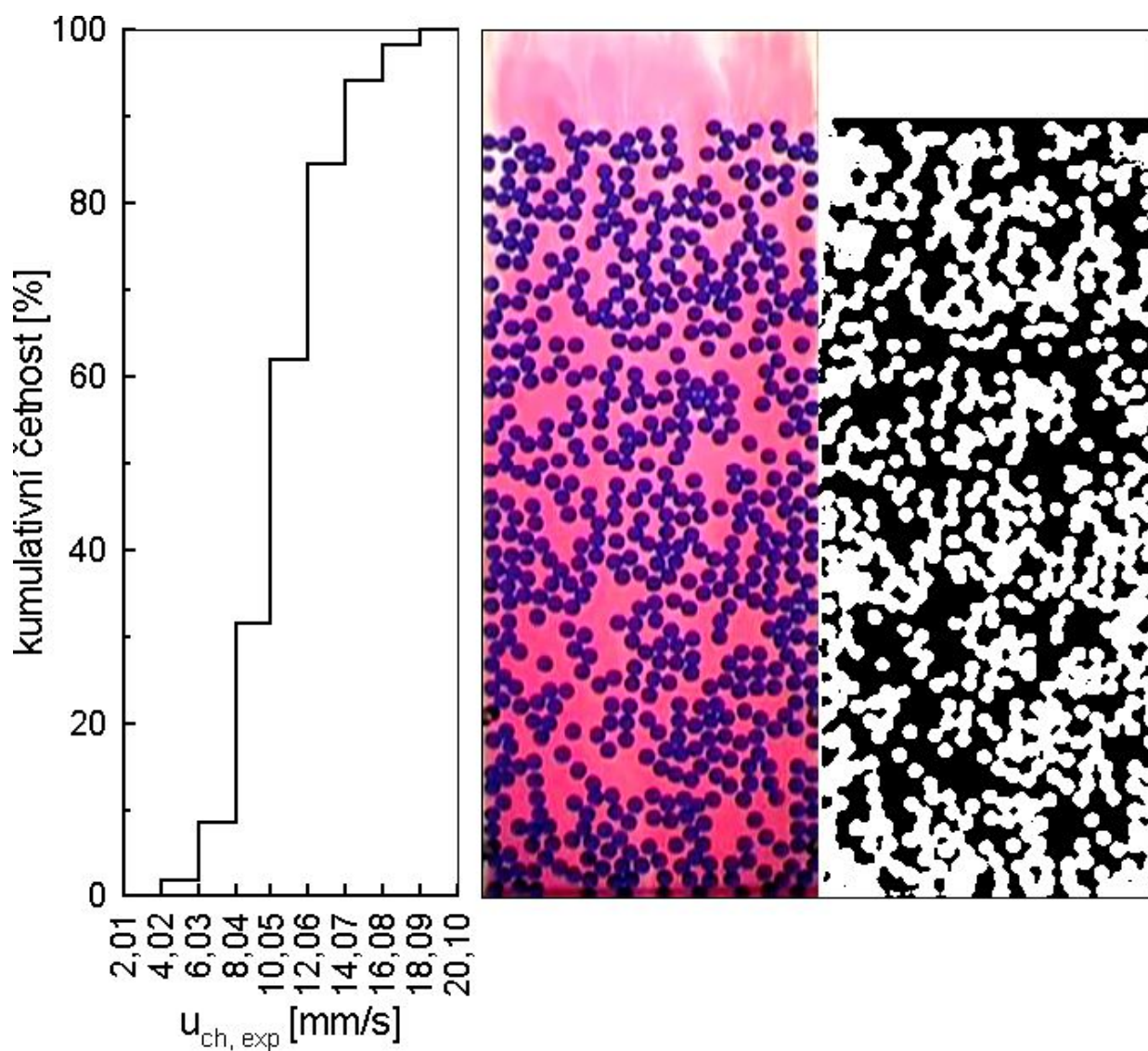
Systém	ε_1	f	u_1 [mm·s ⁻¹]	$u_{ch,vyp}$ [mm·s ⁻¹]	δ
M-NA-A-1	0,4850	0,9574	0,2594	9,0135	3,23%
M-NA-A-2	0,4651	0,9780	0,2130	9,6900	-7,23%
M-NA-A-3	0,5345	0,9812	0,4099	13,6871	-9,49%
M-NA-A-4	0,3190	0,9995	0,0361	14,5728	-16,57%

Tabulka 20: Vypočtené parametry zónového modelu pro systémy M-NA-A

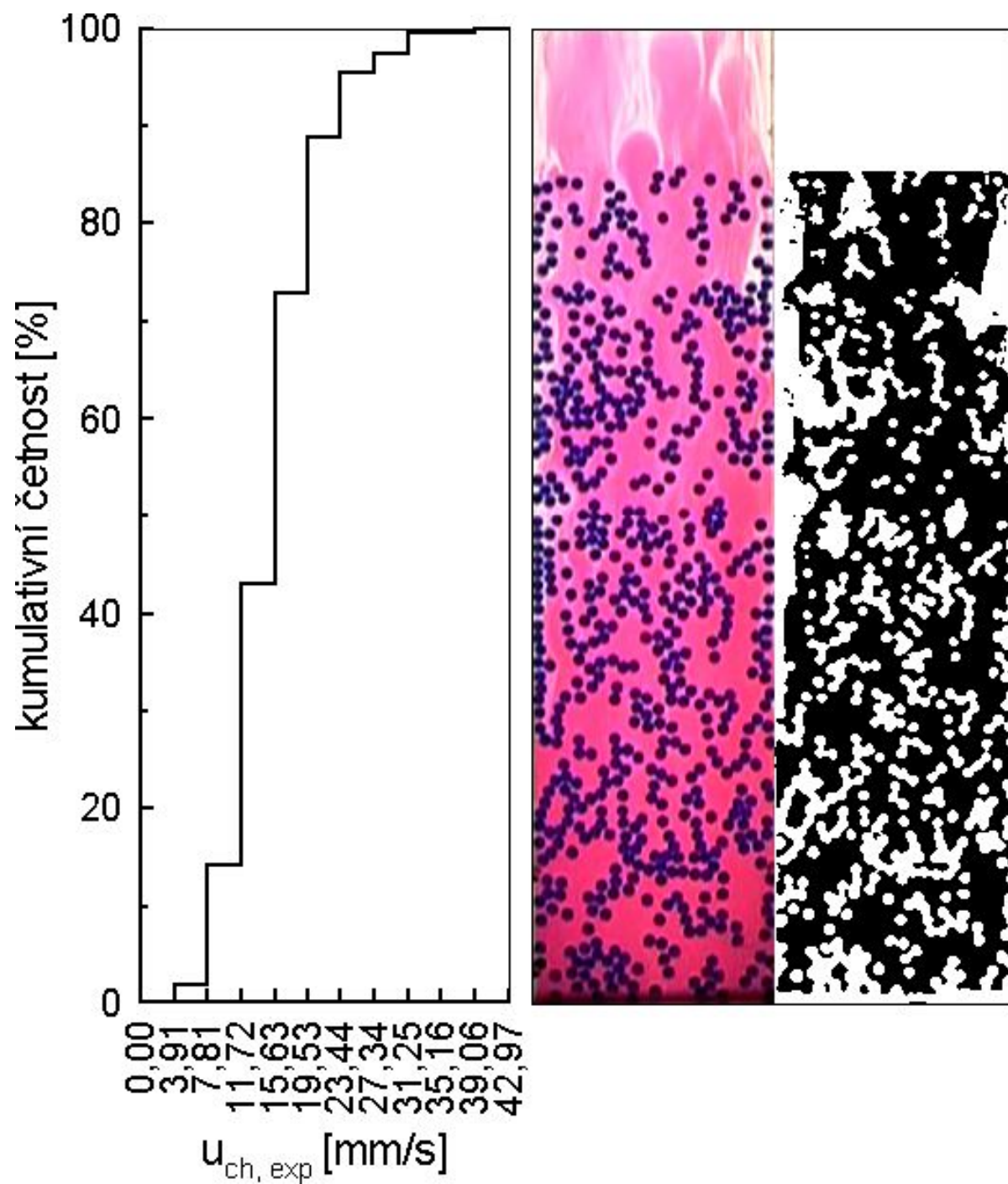
Obrázek 20: Graf závislosti f , ε_1 , ε a u_{ch}/u na u_b pro systém M-NA-A



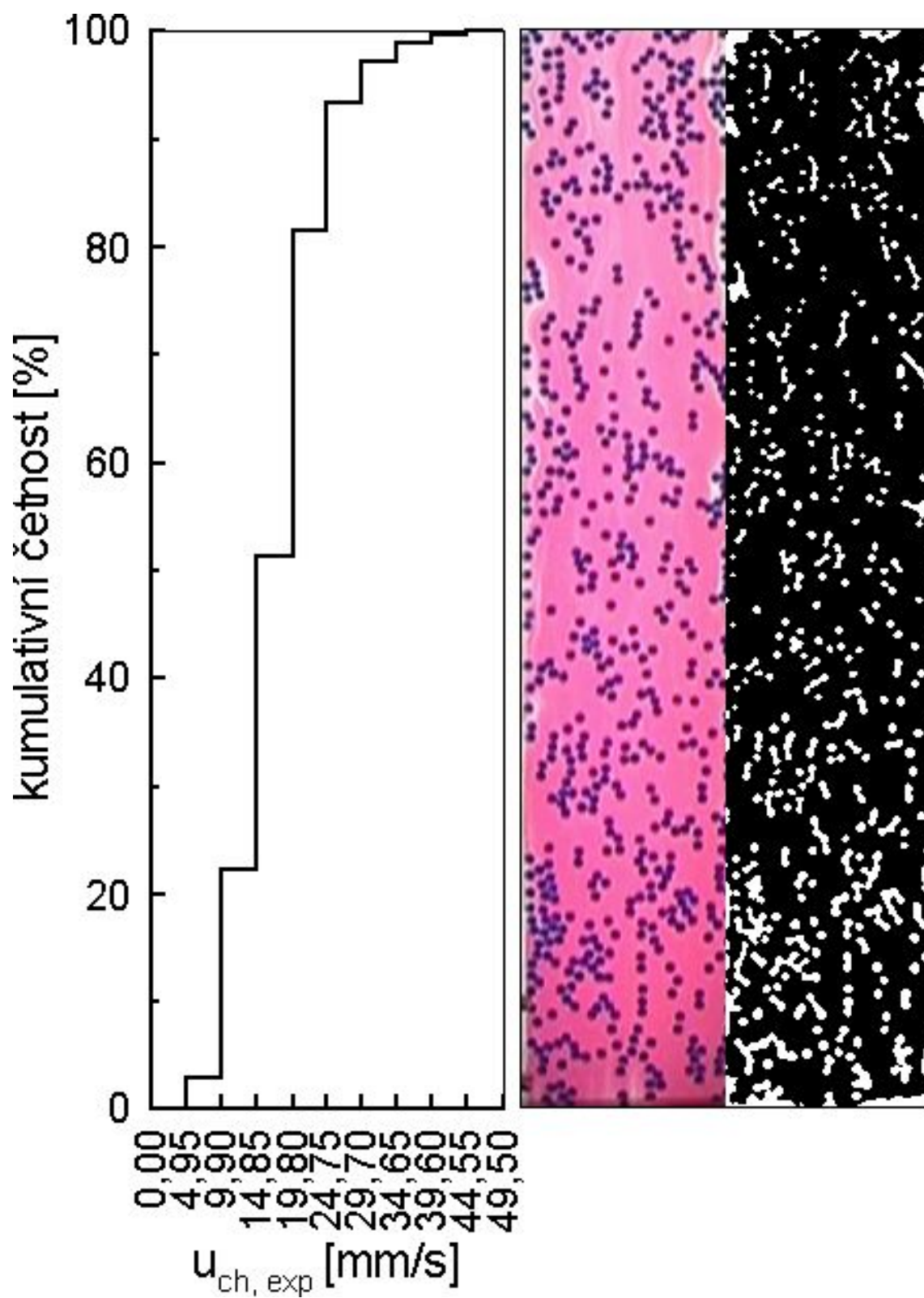
Obrázek 21: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-NA-A-1



Obrázek 22: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-NA-A-2



Obrázek 23: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-NA-A-3



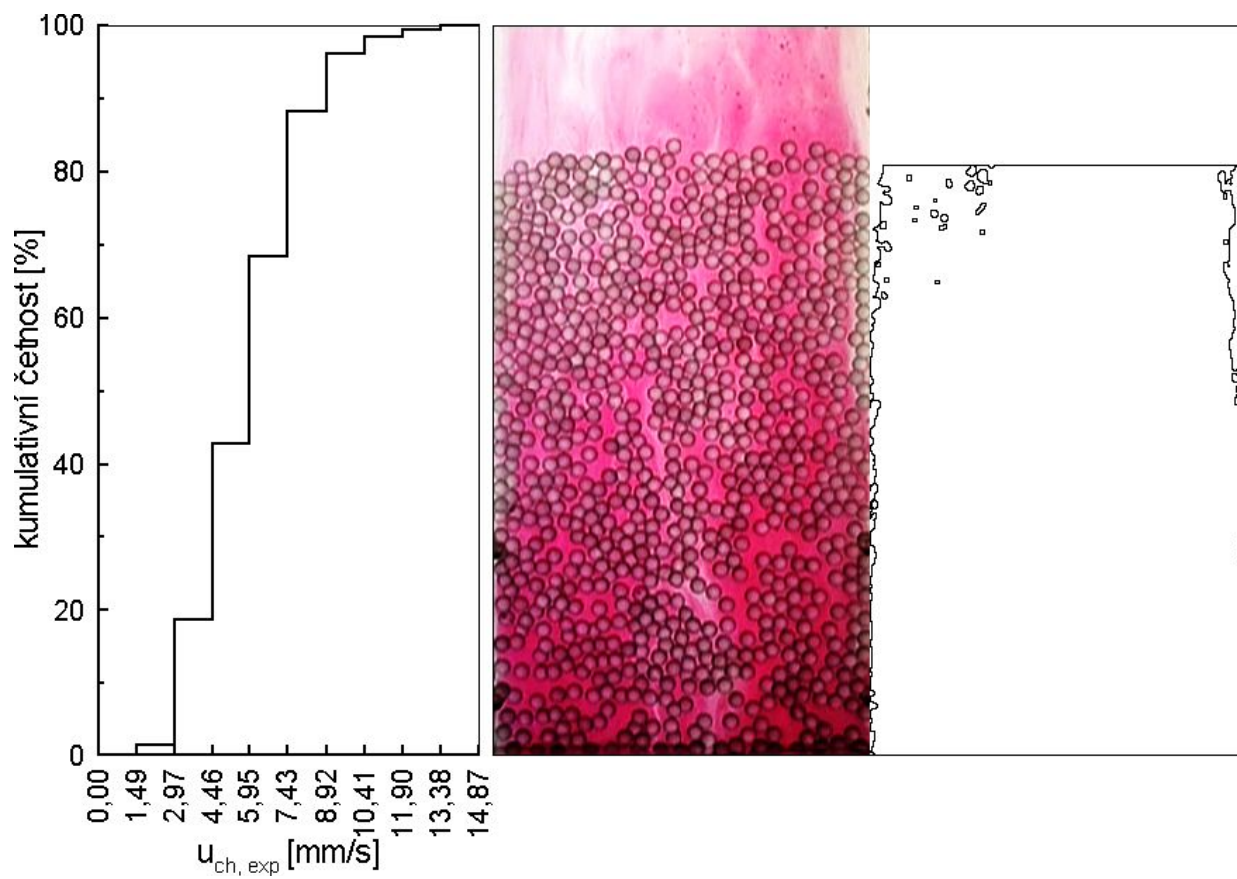
Obrázek 24: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-NA-A-4

Systém	h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re_C
B-NA-A-1	12,5	0,644	0,106	3,55	$3,473 \cdot 10^{-2}$
B-NA-A-2	15	0,703	0,147	4,9	$4,794 \cdot 10^{-2}$
B-NA-A-3	17,5	0,746	0,185	6,2	$6,066 \cdot 10^{-2}$
B-NA-A-4	19,5	0,772	0,218	7,3	$7,142 \cdot 10^{-2}$
B-NA-A-5	22,5	0,802	0,254	8,5	$8,316 \cdot 10^{-2}$
B-NA-A-6	26	0,829	0,287	9,6	$9,392 \cdot 10^{-2}$
B-NA-A-7	31	0,856	0,335	11,2	0,1096

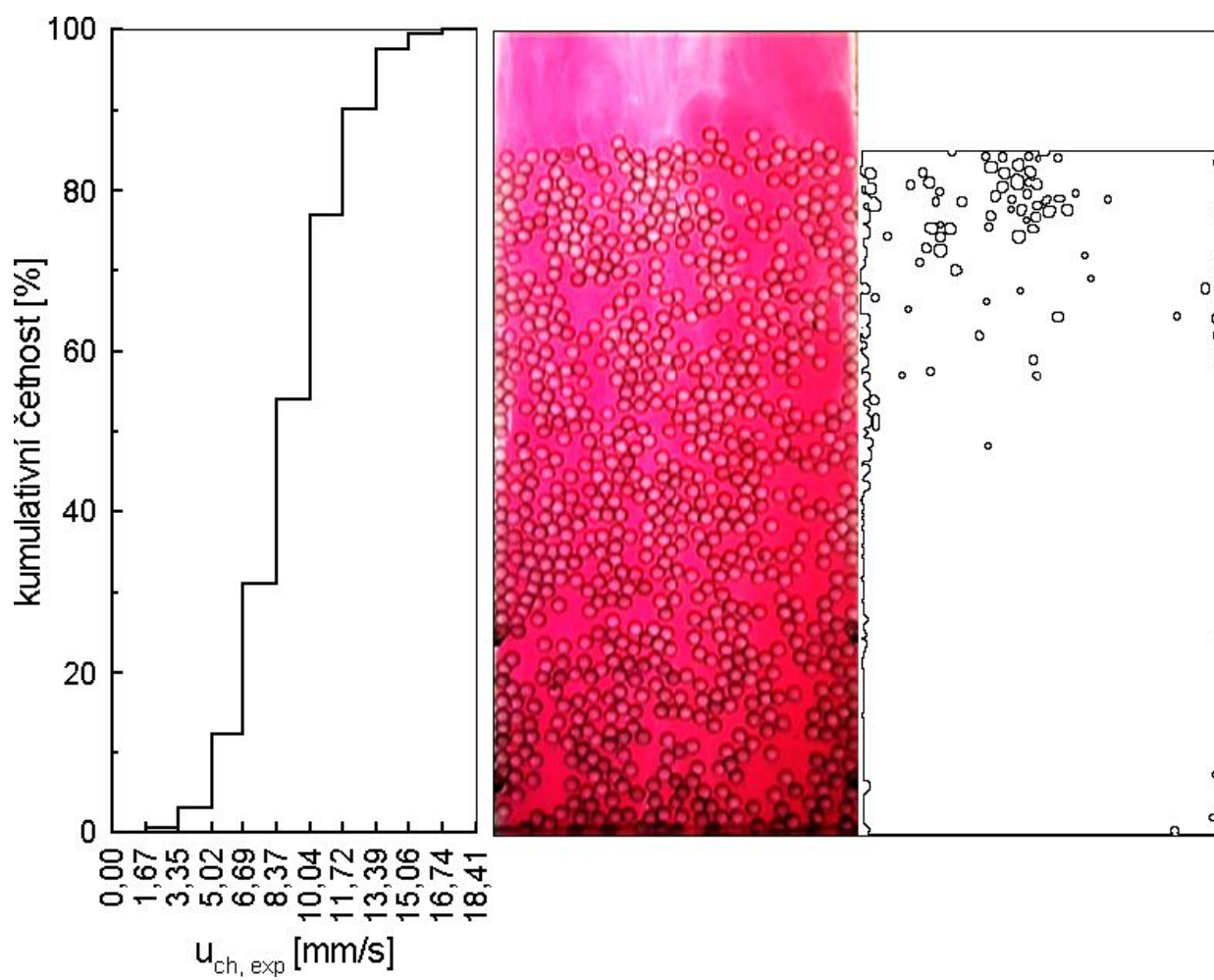
Tabulka 21: Experimentální data pro systémy B-NA-A

Systém	$u_{ch,exp}$ [mm·s ⁻¹]	σ [mm·s ⁻¹]	A_{ch} [cm ²]
B-NA-A-1a	5,7385	2,1270	97,4112
B-NA-A-1b	6,1907	2,2305	90,5204
B-NA-A-2a	9,9033	3,4979	113,1756
B-NA-A-2b	8,9503	2,7262	115,5442
B-NA-A-3a	10,5769	3,2710	133,787
B-NA-A-3b	10,5002	3,0462	132,0769
B-NA-A-4a	13,3239	4,0741	149,5524
B-NA-A-4b	11,6419	3,9754	147,2189
B-NA-A-5a	12,3881	4,6608	163,3493
B-NA-A-5b	12,6099	4,2392	171,3191
B-NA-A-6a	14,5362	4,9825	189,2831
B-NA-A-6b	14,4992	4,9445	201,2712
B-NA-A-7a	17,3593	6,2933	233,0634

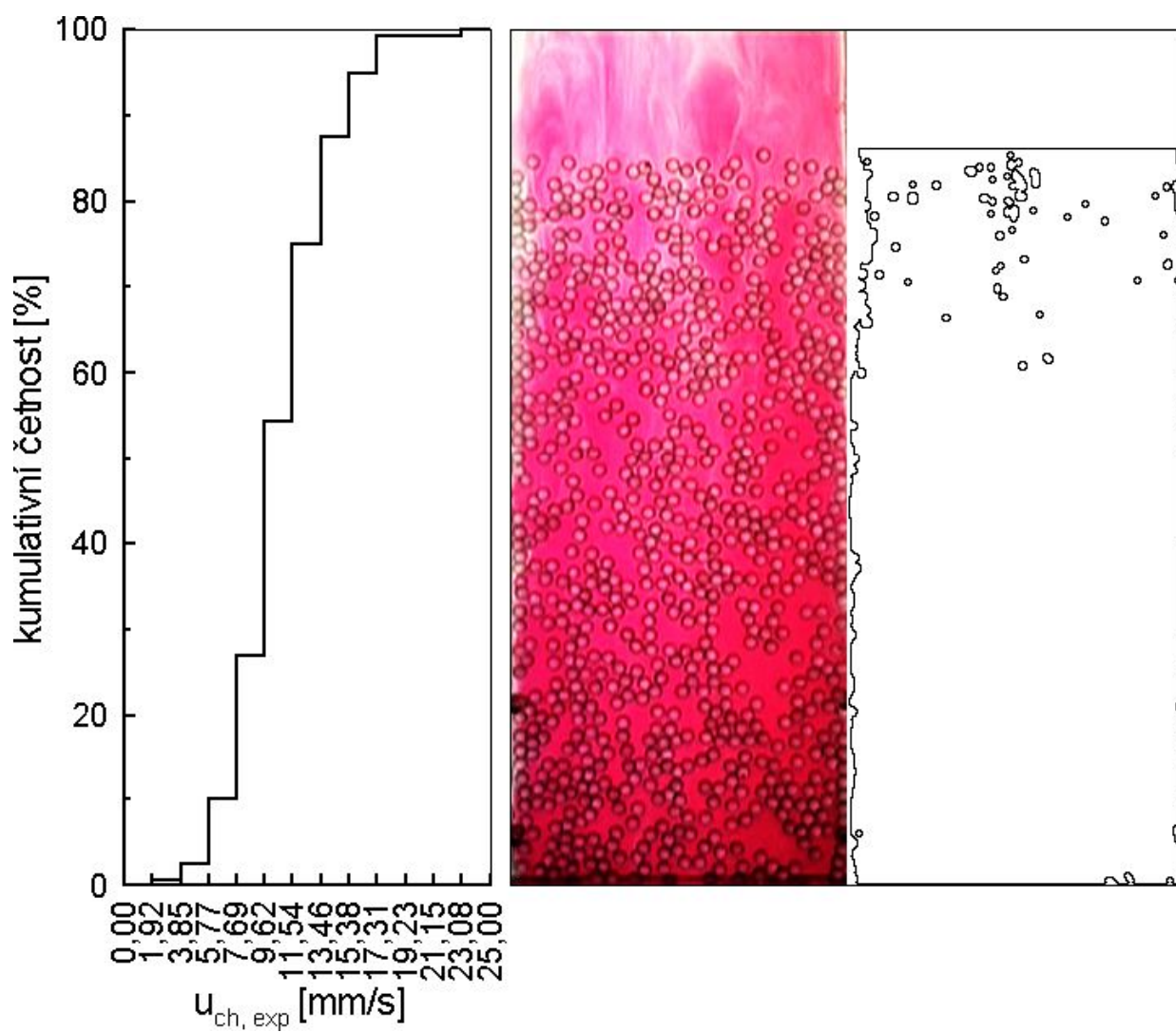
Tabulka 22: Data z analýzy obrazu pro systémy B-NA-A



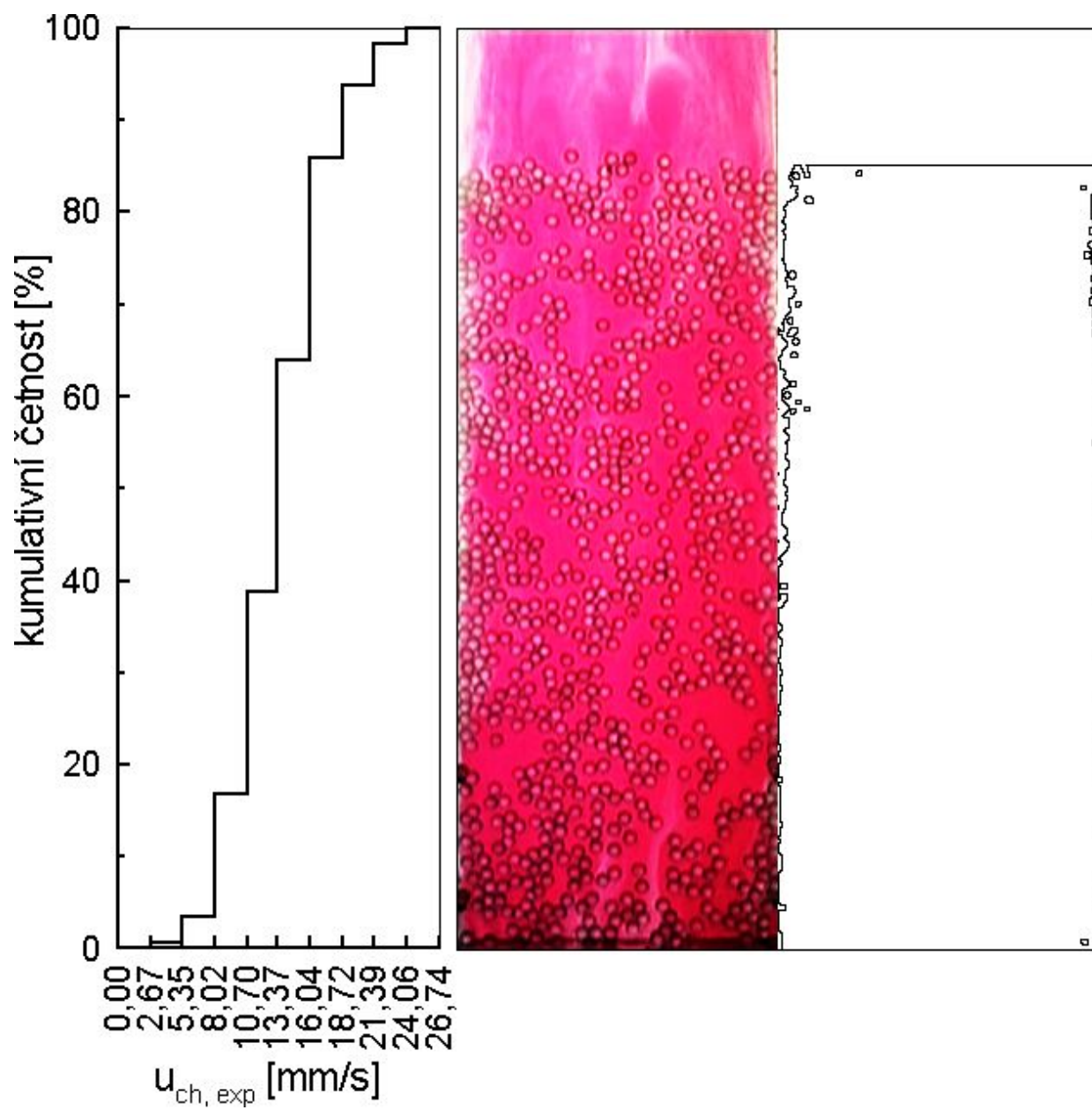
Obrázek 25: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-1a



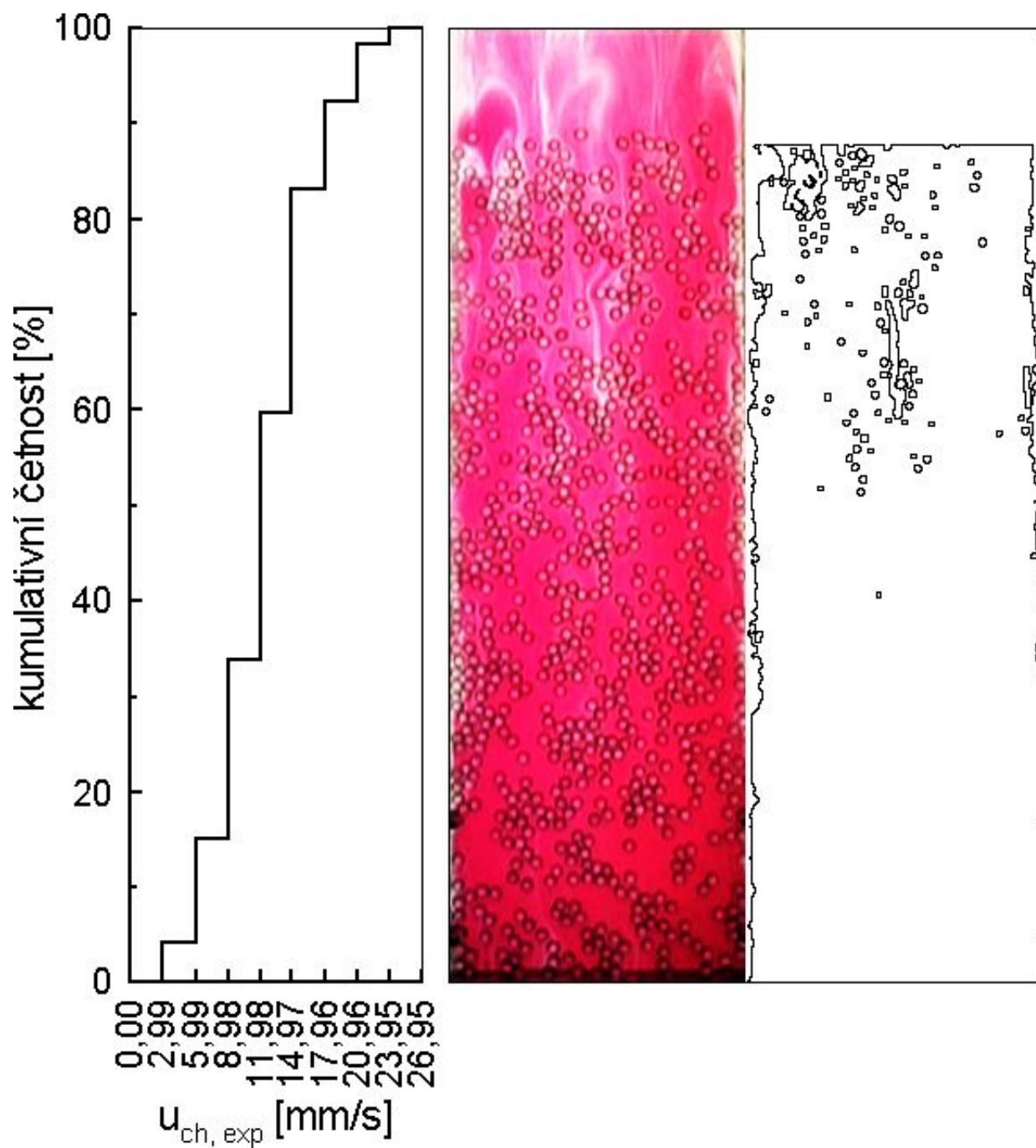
Obrázek 26: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-2b



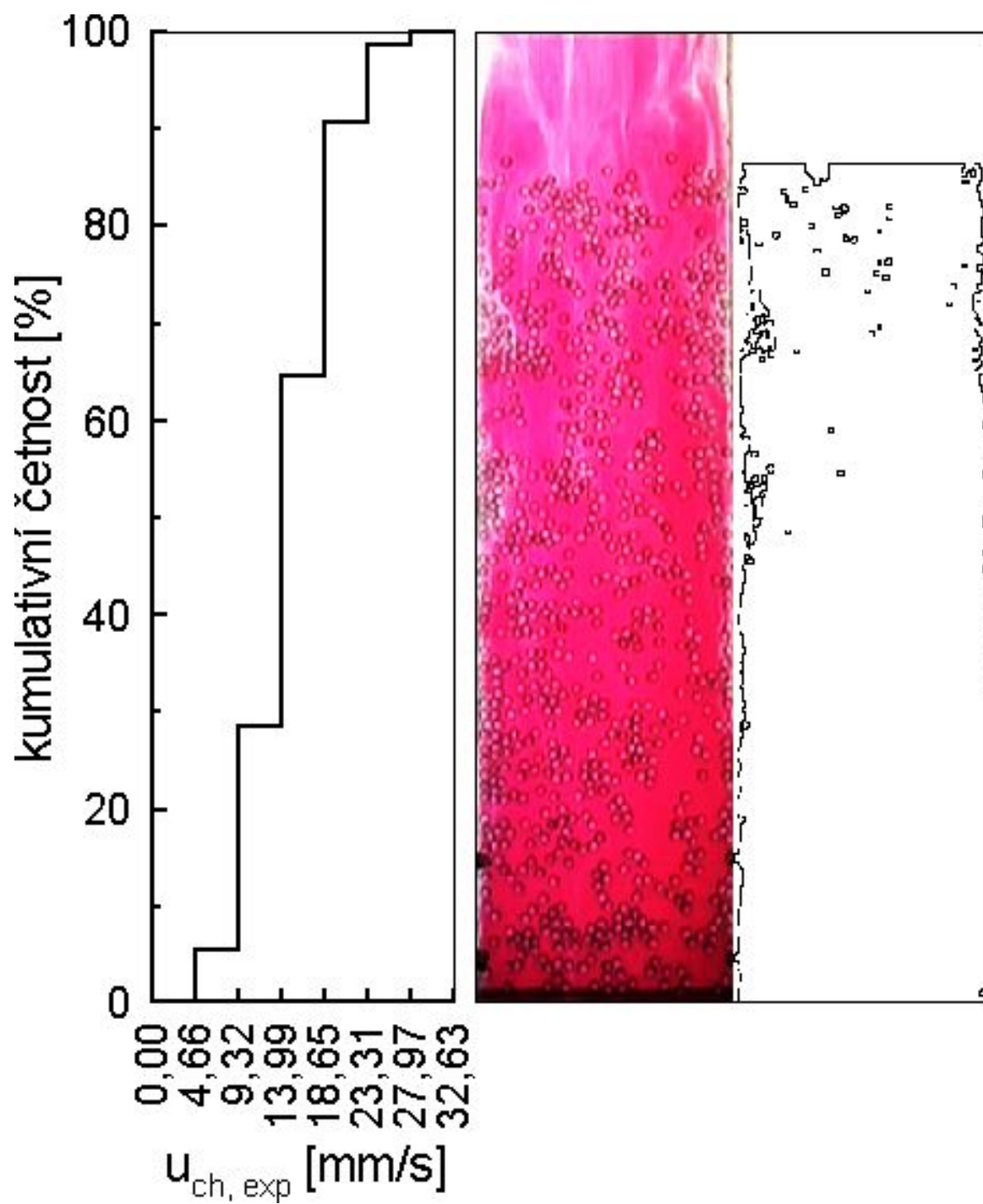
Obrázek 27: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-3a



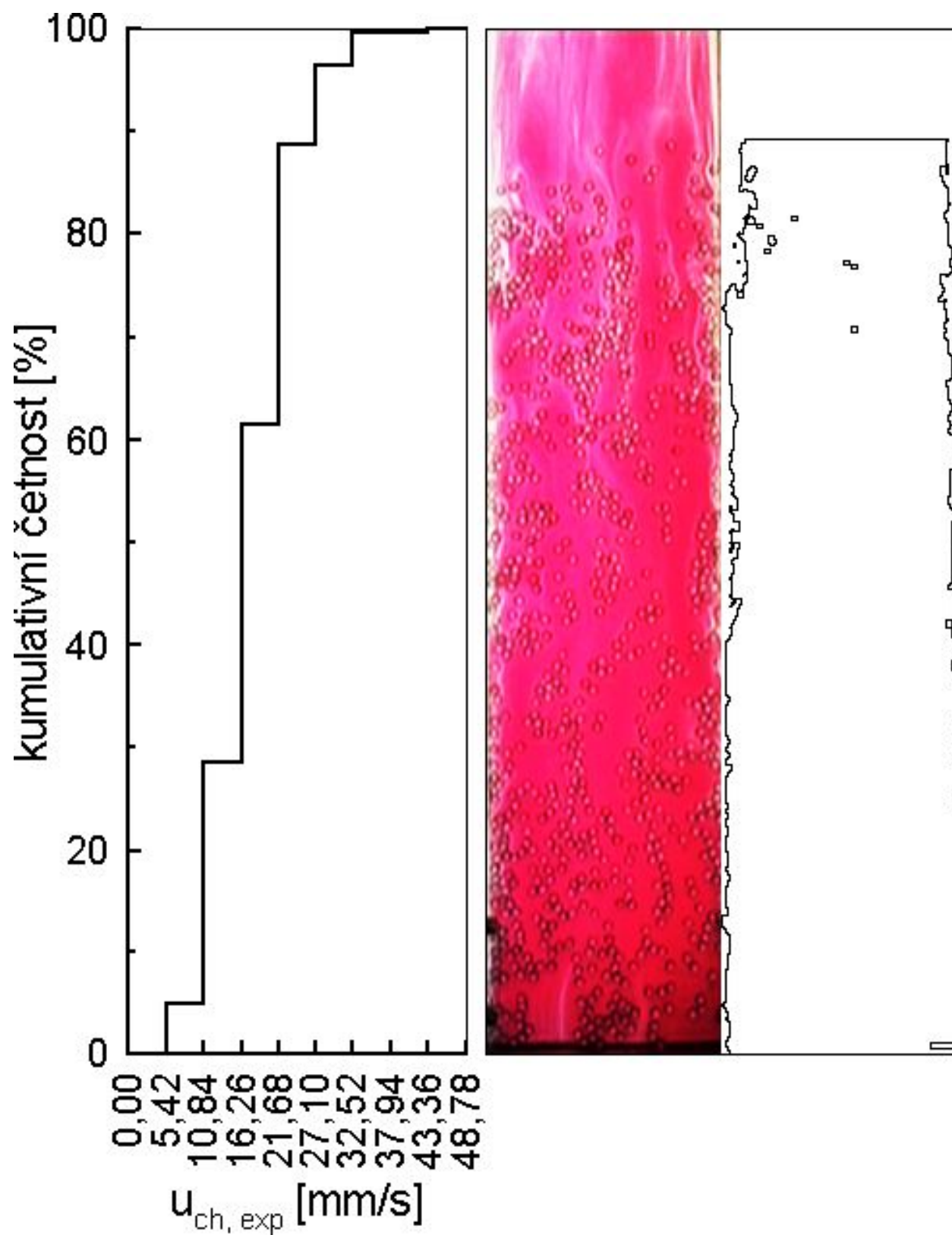
Obrázek 28: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-4a



Obrázek 29: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-5a



Obrázek 30: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-6a



Obrázek 31: Kumulativní distribuce naměřených rychlostí, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-NA-A-7a

Systém	h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re_C
M-PR-F-1	14,5	0,655	0,337	4,17	$1,993 \cdot 10^{-2}$
M-PR-F-2	15,5	0,678	0,452	5,6	$2,676 \cdot 10^{-2}$
M-PR-F-3	16,5	0,697	0,565	7	$3,345 \cdot 10^{-2}$
M-PR-F-4	18	0,722	0,686	8,5	$4,062 \cdot 10^{-2}$
M-PR-F-5	18	0,722	0,832	10,3	$4,922 \cdot 10^{-2}$

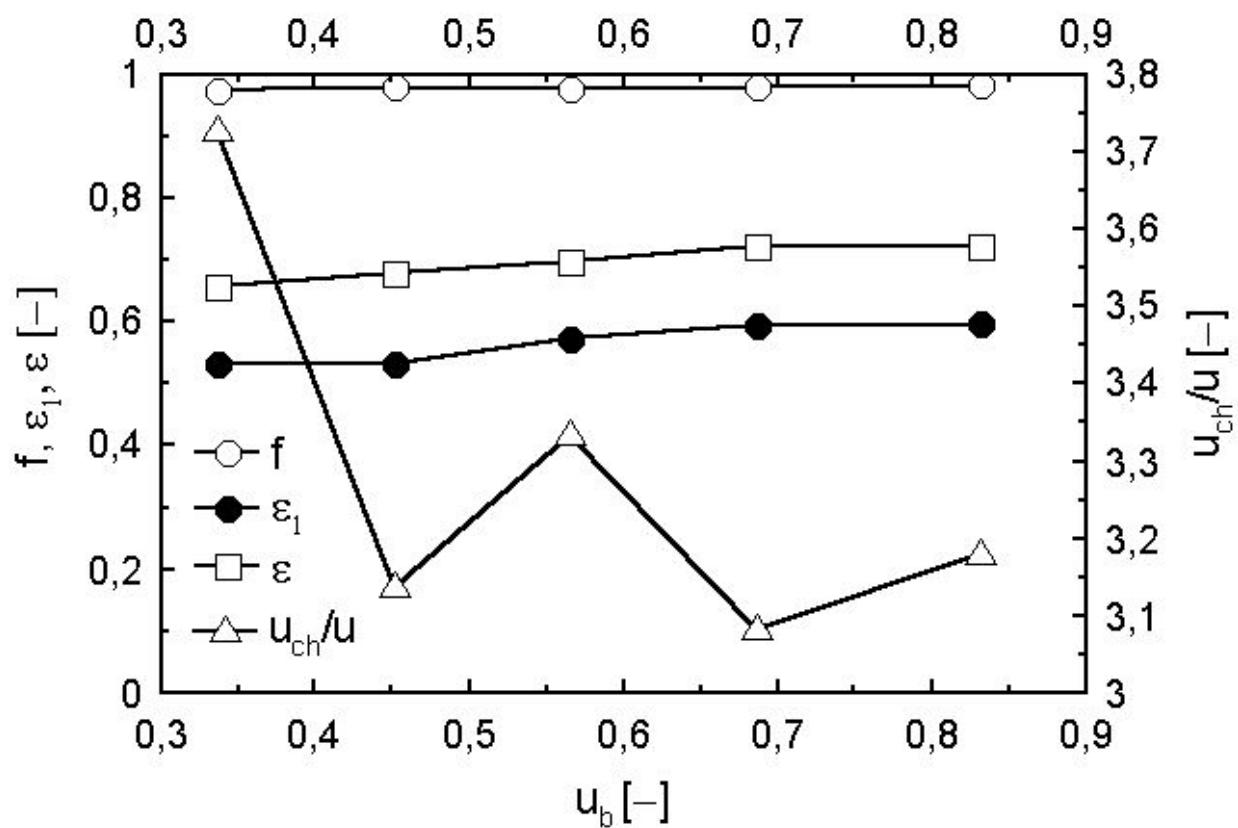
Tabulka 23: Experimentální data pro systémy M-PR-F

Systém	$u_{ch,exp}$ [mm·s ⁻¹]	σ [mm·s ⁻¹]	A_{ch} [cm ²]	q
M-PR-F-1a	13,7775	3,8825	30,2684	1,0357
M-PR-F-1b	13,0572	3,2069	31,0651	1,0464
M-PR-F-2a	17,6503	7,9867	38,7999	1,0211
M-PR-F-2b	19,1864	10,1297	37,0644	1,0154
M-PR-F-3a	24,0948	9,6149	38,7396	1,0247
M-PR-F-3b	19,7439	7,5257	44,5444	1,0208
M-PR-F-4a	26,6340	9,8028	45,7621	1,0153
M-PR-F-4b	27,4740	12,3214	44,9104	1,0193
M-PR-F-5a	34,0726	17,7077	44,487	1,0186
M-PR-F-5b	42,3318	14,0141	35,889	1,0081

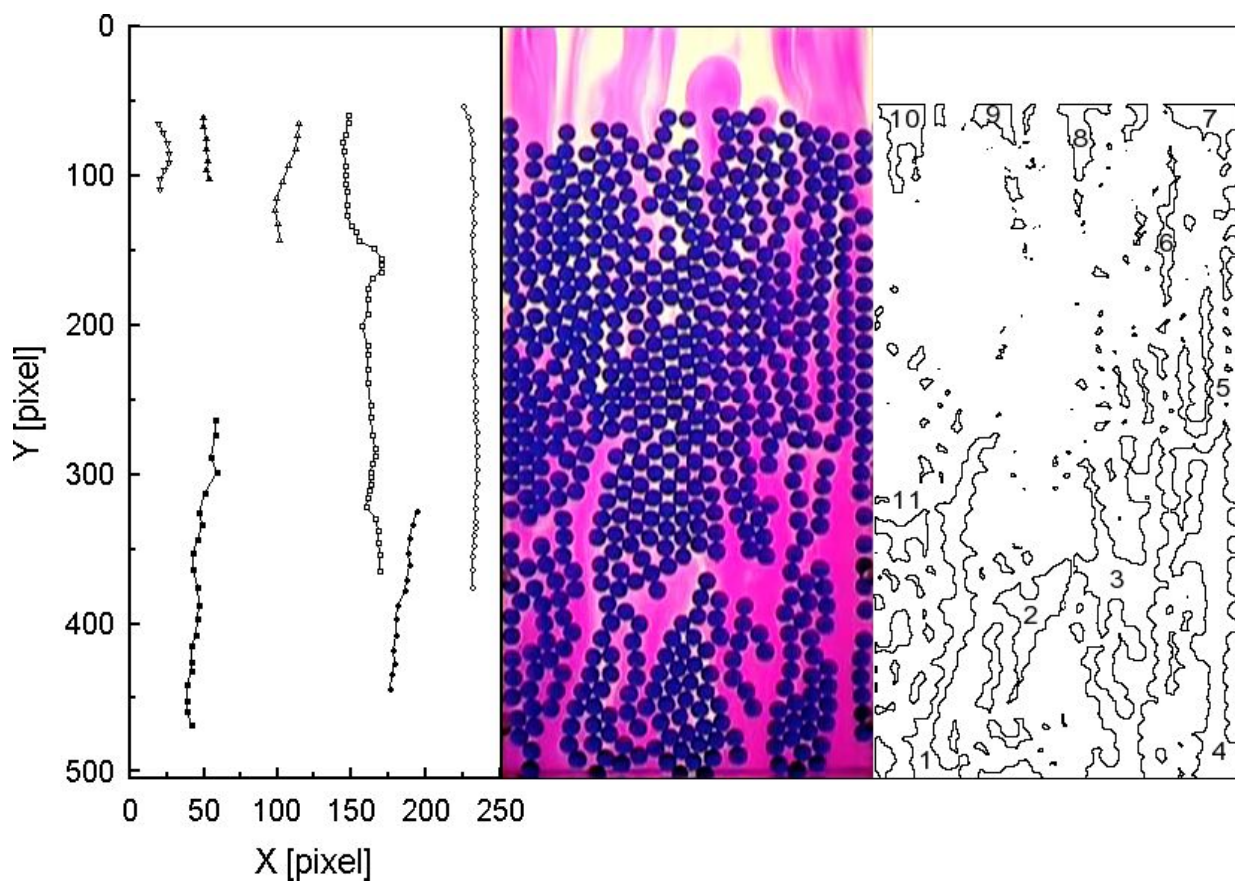
Tabulka 24: Data z analýzy obrazu pro systémy M-PR-F

Systém	ε_1	f	u_1 [mm·s ⁻¹]	$u_{ch,vyp}$ [mm·s ⁻¹]	δ
M-PR-F-1a	0,5336	0,9728	0,1536	15,5461	12,84%
M-PR-F-1b	0,5293	0,9741	0,1477	15,1673	16,16%
M-PR-F-2a	0,5307	0,9816	0,1497	17,5683	-0,46%
M-PR-F-2b	0,5401	0,9797	0,1625	18,3538	-4,34%
M-PR-F-3a	0,5713	0,9786	0,2117	23,3419	-3,12%
M-PR-F-3b	0,5428	0,9842	0,1664	20,4166	3,41%
M-PR-F-4a	0,5930	0,9797	0,2524	26,2052	-1,61%
M-PR-F-4b	0,5965	0,9790	0,2595	26,6817	-2,88%
M-PR-F-5a	0,5982	0,9824	0,2630	32,7517	-3,88%
M-PR-F-5b	0,6302	0,9755	0,3361	40,3151	-4,76%

Tabulka 25: Vypočtené parametry zónového modelu pro systémy M-PR-F



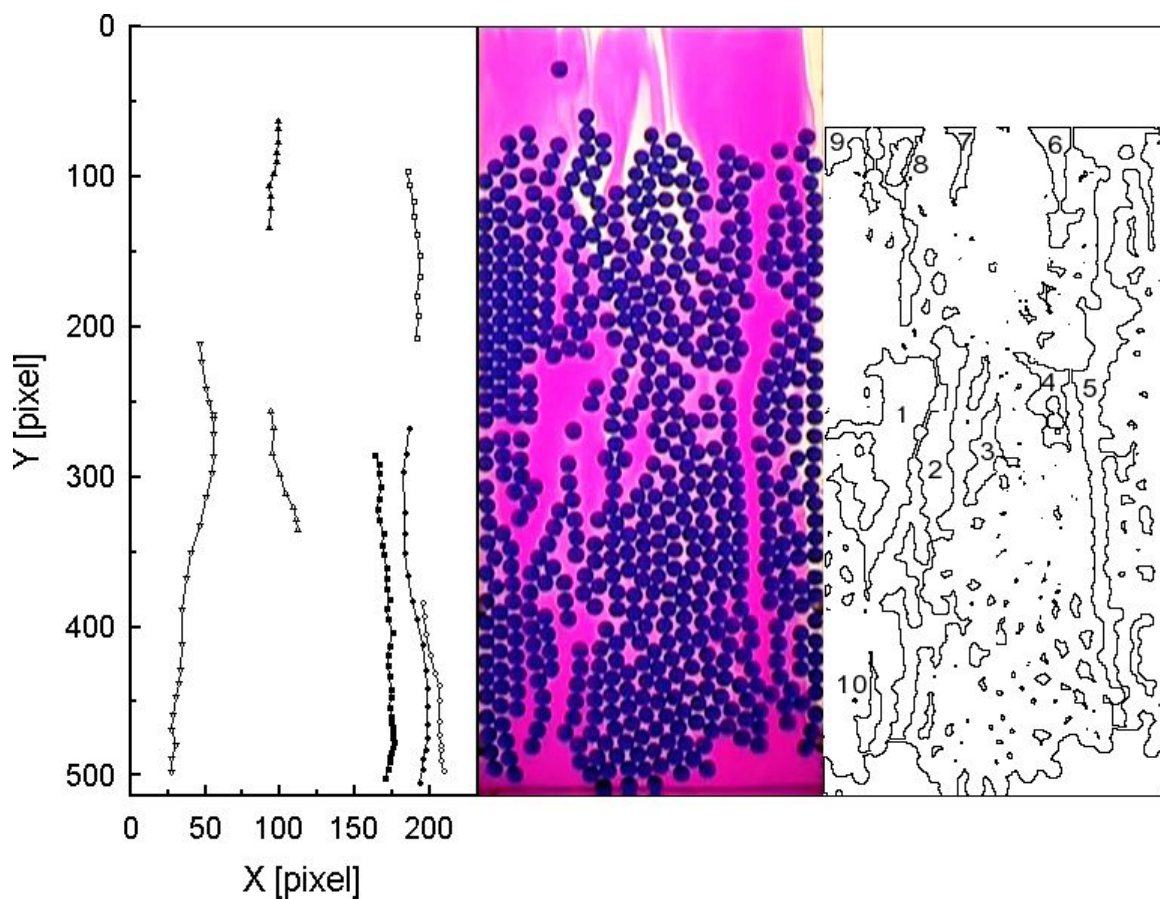
Obrázek 32: Graf závislosti $f, \varepsilon_1, \varepsilon$ a u_{ch}/u na u_b pro systém M-PR-F



Obrázek 33: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-1a

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	2,6644	5,911	0,5739	82,0849	7,5675
2	1,3793	1,9257	0,912	61,1704	2,7989
3	5,1569	5,2733	1,2451	86,6711	7,3933
4	4,692	6,5487	0,9122	93,0276	7,5472
5	1,0783	2,3496	0,5843	84,2973	3,3115
6	0,7199	2,8092	0,3263	87,1167	3,4613
7	0,7619	1,326	0,7315	162,8435	1,6769
8	0,596	1,3366	0,5677	91,5579	1,7233
9	0,3625	0,8835	0,5224	150,1212	1,109
10	0,8079	1,4711	0,6993	82,9955	1,9632
11	0,514	0,9213	0,7104	15,4023	1,3057

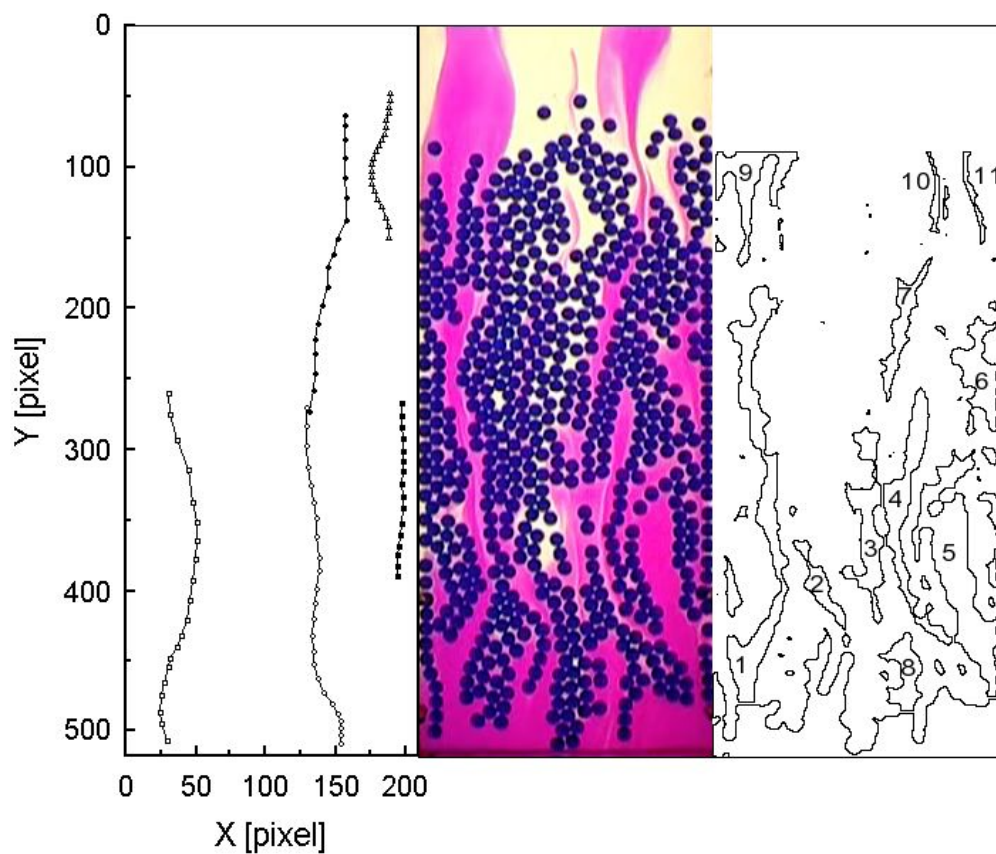
Tabulka 26: Popis kanálek pro systém M-PR-F-1a



Obrázek 34: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-2a

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	4,5169	4,2153	1,3643	76,3287	5,5567
2	4,5289	7,1113	0,8109	83,4201	9,6051
3	0,8636	2,0968	0,5244	74,987	2,5081
4	1,462	2,1222	0,8772	104,9502	2,6977
5	6,7489	9,7925	0,8775	88,5609	13,8653
6	1,0698	2,5989	0,5241	94,9804	2,8309
7	0,3574	1,3864	0,3282	84,1236	1,6888
8	1,077	3,1925	0,4295	94,7173	4,5792
9	0,5349	1,017	0,6697	46,2503	1,4012
10	0,4114	1,4342	0,3652	77,9892	1,8959

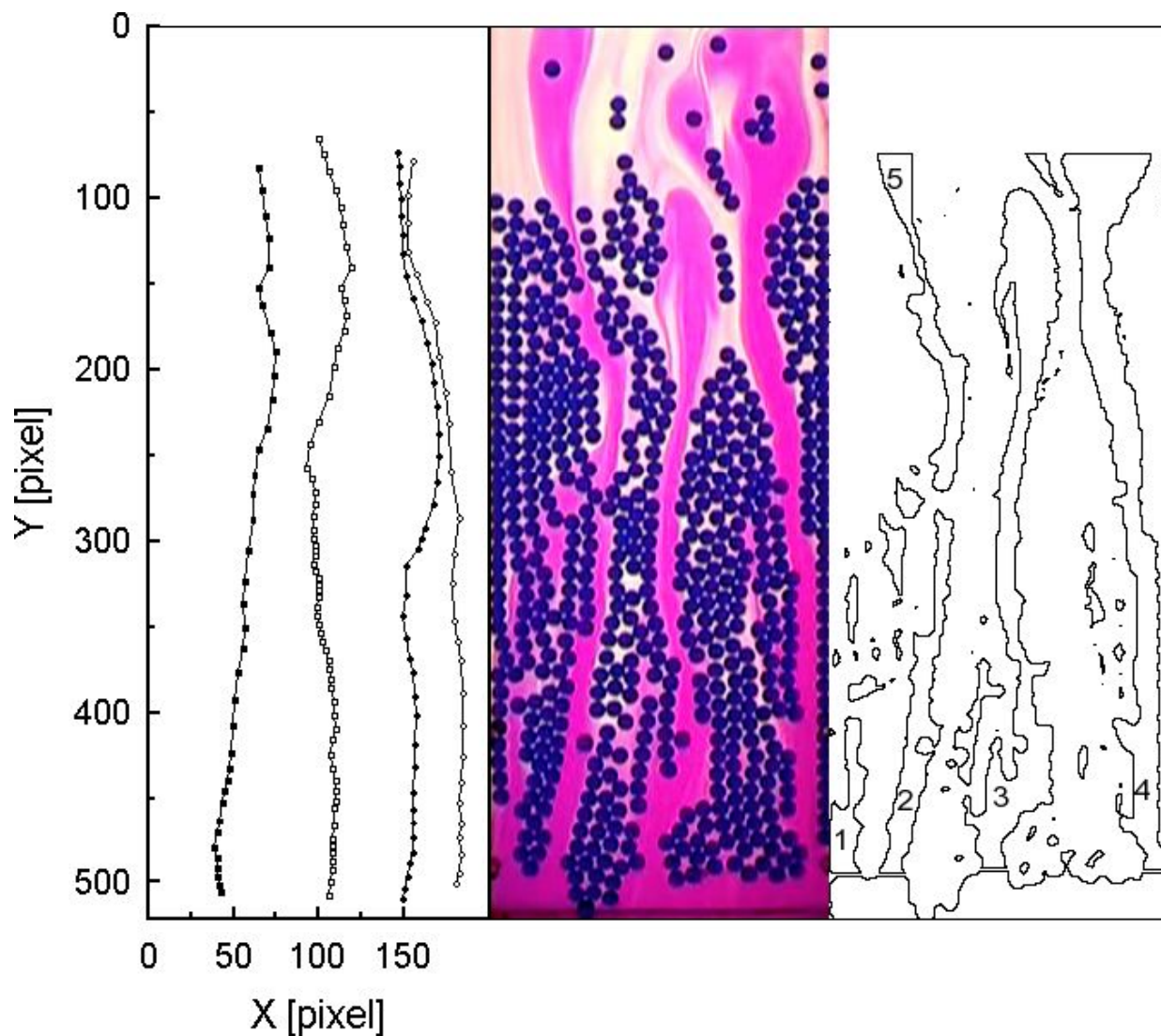
Tabulka 27: Popis kanálek pro systém M-PR-F-2a



Obrázek 35: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-3a

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	4,4201	7,5249	0,7479	89,8943	11,2929
2	0,5607	1,6246	0,4394	120,8021	1,9464
3	2,605	4,361	0,7606	91,5507	5,3983
4	3,1124	4,4312	0,8943	91,1348	7,1229
5	6,0074	5,7502	1,3302	103,7767	6,8424
6	2,1672	2,7799	0,9926	96,1506	3,322
7	0,9497	2,9871	0,4048	75,9889	3,8462
8	1,0192	1,852	0,7007	92,1629	2,0858
9	1,7722	1,7559	1,285	77,1875	3,3885
10	0,4068	2,0154	0,257	92,0207	2,2637
11	0,4438	2,41	0,2345	103,5333	2,5949

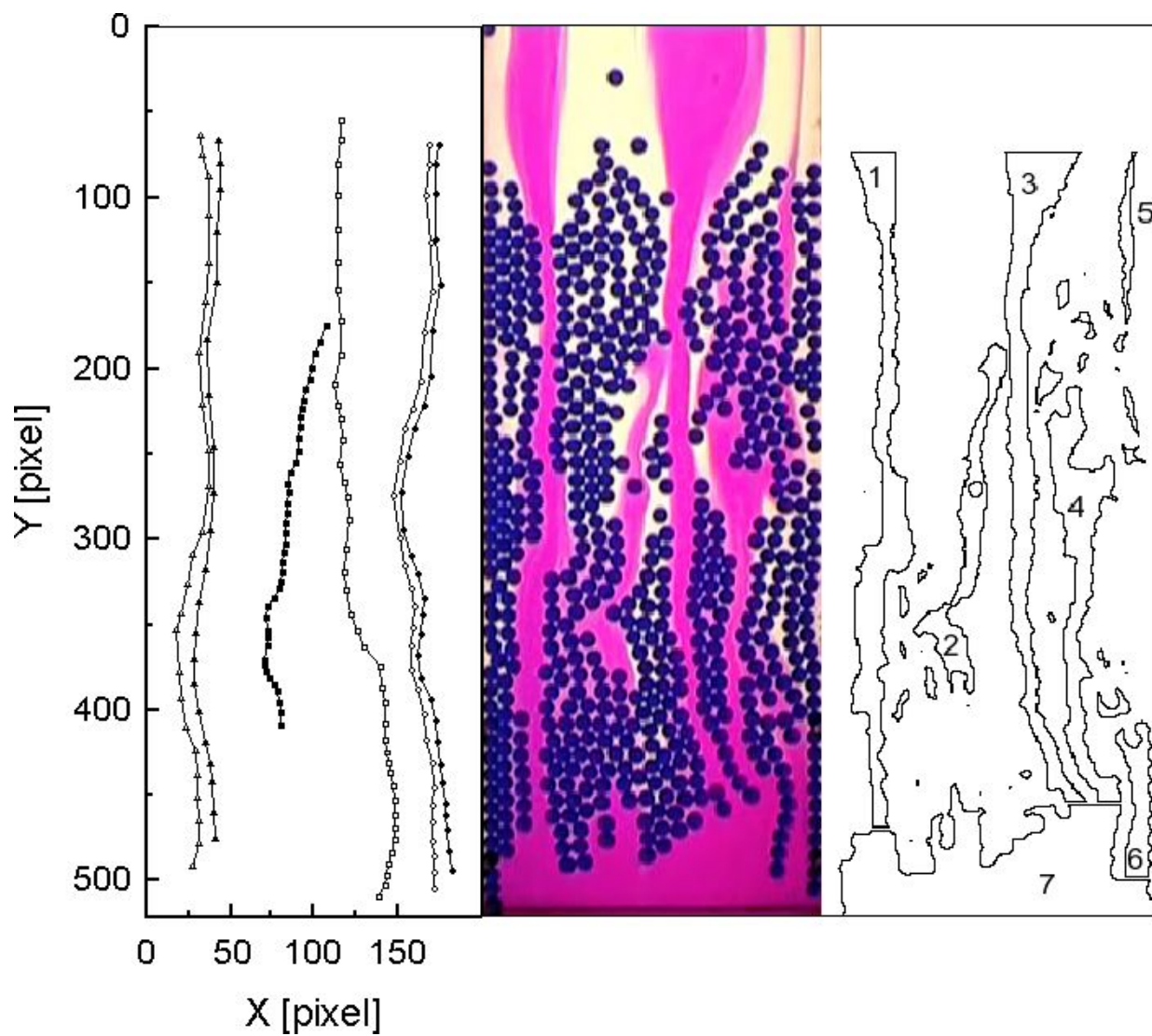
Tabulka 28: Popis kanálek pro systém M-PR-F-3a



Obrázek 36: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-4b

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	1,4464	3,4174	0,5389	83,9515	3,6283
2	3,3324	7,8942	0,5375	81,4975	8,5521
3	10,2074	13,5358	0,9602	88,1964	15,9441
4	11,1706	15,0156	0,9472	94,8508	16,9308
5	2,9866	6,3235	0,6013	101,1509	8,0418

Tabulka 29: Popis kanálek pro systém M-PR-F-4b



Obrázek 37: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému M-PR-F-5a

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	9,9181	14,9209	0,8463	89,0435	17,0135
2	3,8965	6,6299	0,7483	81,5223	8,353
3	12,8482	9,73	1,6813	87,1447	15,4826
4	6,0524	8,0967	0,9518	92,4949	9,9134
5	1,0876	4,1686	0,3322	87,7928	4,8043
6	1,8779	3,7089	0,6447	90,9999	3,7298
7	12,7399	6,4831	2,502	4,5448	7,6243

Tabulka 30: Popis kanálek pro systém M-PR-F-5a

Systém	h [cm]	ε	u_b	u [mm·s ⁻¹]	Re_C
B-PR-F-1	12,5	0,644	0,339	4,15	$1,947 \cdot 10^{-2}$
B-PR-F-2	13	0,658	0,458	5,6	$2,627 \cdot 10^{-2}$
B-PR-F-3	13,5	0,671	0,572	7	$3,284 \cdot 10^{-2}$
B-PR-F-4	14	0,682	0,695	8,5	$3,988 \cdot 10^{-2}$
B-PR-F-5	14,5	0,693	0,826	10,1	$4,739 \cdot 10^{-2}$
B-PR-F-6	14	0,682	0,940	11,5	$5,396 \cdot 10^{-2}$
B-PR-F-7	15,5	0,713	1,063	13	$6,099 \cdot 10^{-2}$

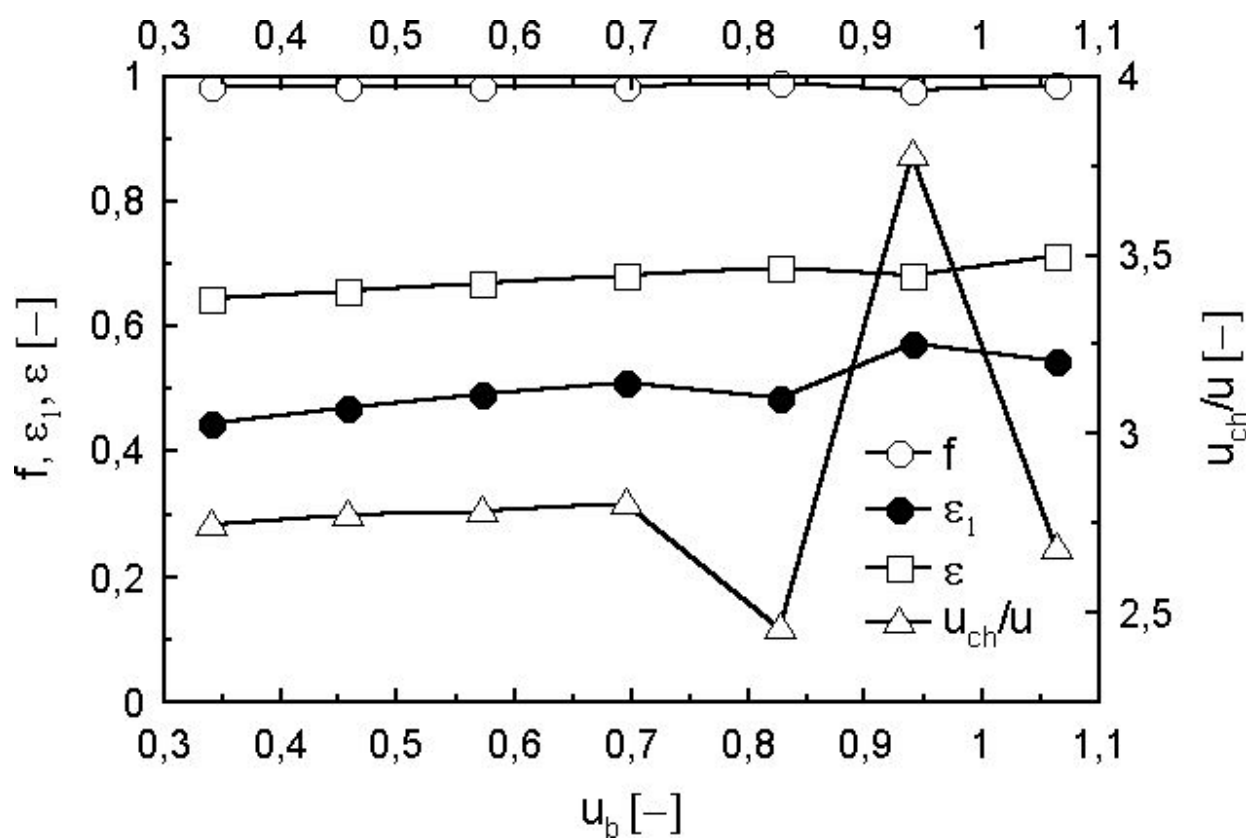
Tabulka 31: Experimentální data pro systémy B-PR-F

Systém	$u_{ch,exp}$ [mm·s ⁻¹]	σ [mm·s ⁻¹]	A_{ch} [cm ²]	q
B-PR-F-1a	15,6969	7,6550	35,8126	1,0192
B-PR-F-1b	13,8938	5,8643	47,2822	1,0188
B-PR-F-2a	18,3633	7,3257	36,9016	1,0181
B-PR-F-2b	18,9824	8,7577	42,0535	1,0135
B-PR-F-3a	25,0677	8,5120	47,1453	1,0249
B-PR-F-3b	26,9365	12,3993	38,1766	1,0164
B-PR-F-4a	26,2076	13,9918	39,2241	1,0303
B-PR-F-4b	26,0353	12,0915	49,3168	1,0187
B-PR-F-5a	29,7621	14,1076	46,7571	1,0112
B-PR-F-5b	37,1544	14,8099	40,0938	1,0274
B-PR-F-6a	45,0120	15,7631	28,9405	1,0195
B-PR-F-6b	56,6358	22,1718	25,4252	1,0222
B-PR-F-7a	44,4727	16,6716	44,0226	1,0097
B-PR-F-7b	39,0075	18,4445	45,6144	1,0154

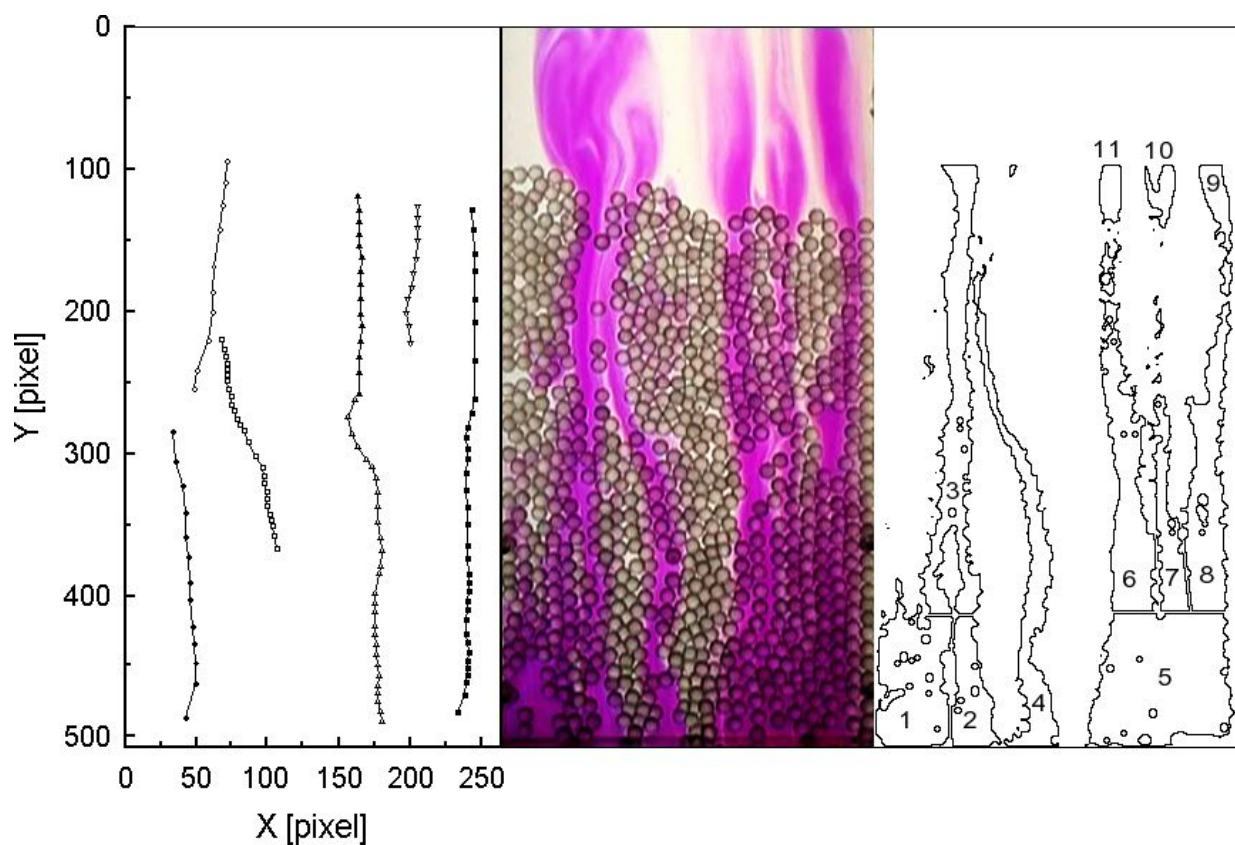
Tabulka 32: Data z analýzy obrazu pro systémy B-PR-F

Systém	ε_1	f	u_1 [mm·s ⁻¹]	$u_{ch,vyp}$ [mm·s ⁻¹]	δ
B-PR-F-1a	0,4458	0,9825	0,1132	11,3852	-27,47%
B-PR-F-1b	0,3252	0,9967	0,0256	8,7485	-37,03%
B-PR-F-2a	0,4698	0,9833	0,1450	15,5189	-15,49%
B-PR-F-2b	0,4257	0,9903	0,0912	13,7148	-27,75%
B-PR-F-3a	0,4154	0,9935	0,0812	15,9307	-36,45%
B-PR-F-3b	0,5181	0,9784	0,2299	20,0916	-25,41%
B-PR-F-4a	0,5112	0,9835	0,2158	23,8705	-8,92%
B-PR-F-4b	0,4325	0,9935	0,0982	19,1790	-26,33%
B-PR-F-5a	0,4862	0,9899	0,1705	24,8047	-16,66%
B-PR-F-5b	0,5313	0,9832	0,2589	28,7314	-22,67%
B-PR-F-6a	0,5717	0,9764	0,3655	43,4562	-3,46%
B-PR-F-6b	0,5891	0,9717	0,4209	49,2254	-13,08%
B-PR-F-7a	0,5552	0,9842	0,3184	36,0392	-18,96%
B-PR-F-7b	0,5462	0,9857	0,2947	34,8333	-10,70%

Tabulka 33: Vypočtené parametry zónového modelu pro systémy B-PR-F



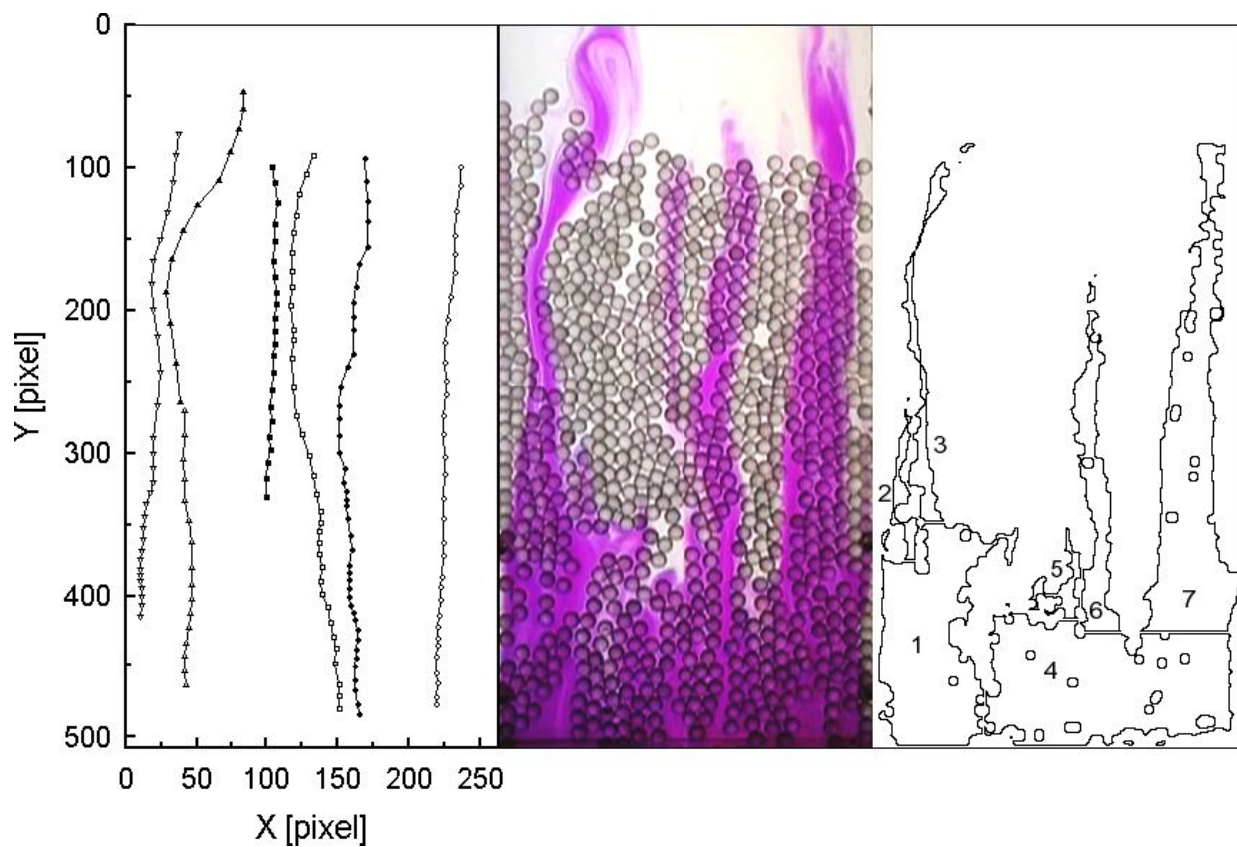
Obrázek 38: Graf závislosti f , ε_1 , ε a u_{ch}/u na u_b pro systém B-PR-F



Obrázek 39: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-1a

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	3,5512	2,9843	1,5151	88,795	3,1556
2	1,5591	2,7812	0,7138	95,6797	2,8112
3	4,2405	8,5679	0,6302	88,3089	9,628
4	2,8091	5,9571	0,6004	96,4452	10,222
5	7,02	3,2193	2,7764	41,5059	3,9367
6	4,1378	6,6476	0,7925	94,8516	6,8263
7	1,3379	4,1967	0,4059	94,7737	4,6116
8	3,3671	5,9682	0,7183	87,8705	6,6142
9	0,6634	2,2644	0,373	99,3472	2,798
10	0,3858	0,9983	0,4921	84,7367	1,3207
11	0,4414	1,2404	0,4531	89,5933	1,211

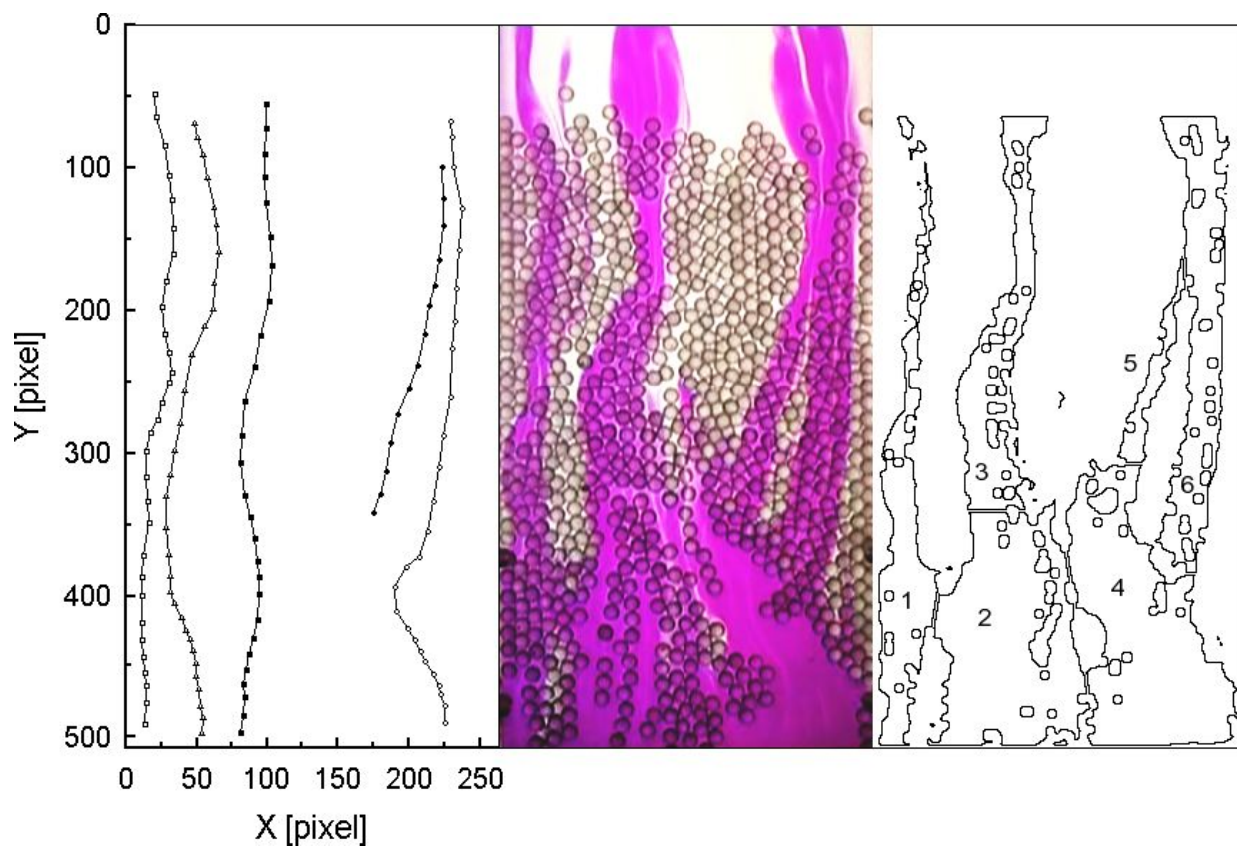
Tabulka 34: Popis kanálek pro systém B-PR-F-1a



Obrázek 40: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-2a

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	7,4059	4,7283	1,9942	88,358	4,8803
2	0,6866	2,3665	0,3694	92,8354	3,2335
3	1,7025	5,0793	0,4268	89,1227	7,7093
4	10,834	5,5372	2,4912	179,3286	5,5791
5	0,6717	1,1716	0,73	72,0041	1,9725
6	2,996	6,4784	0,5888	92,6179	6,9132
7	9,7486	9,5187	1,304	87,6174	10,5619

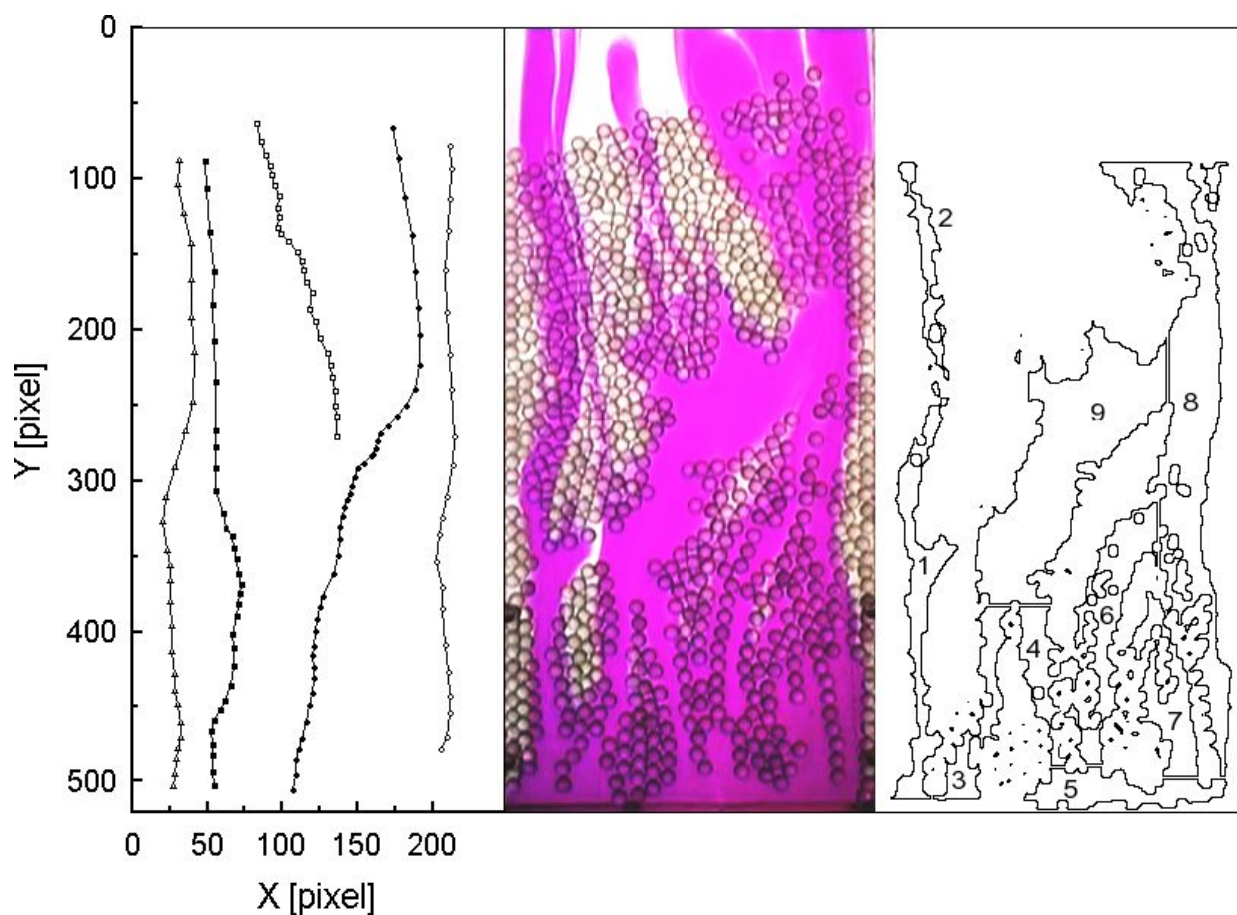
Tabulka 35: Popis kanálek pro systém B-PR-F-2a



Obrázek 41: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-3a

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	6,4898	9,7218	0,85	87,6214	12,5094
2	12,0322	5,102	3,0027	89,0621	5,7548
3	5,2879	7,3705	0,9135	83,0405	8,5307
4	11,6306	6,1265	2,4171	109,1147	6,5991
5	0,9891	3,7438	0,3364	73,6323	4,4793
6	6,5019	9,324	0,8879	88,6516	9,7286

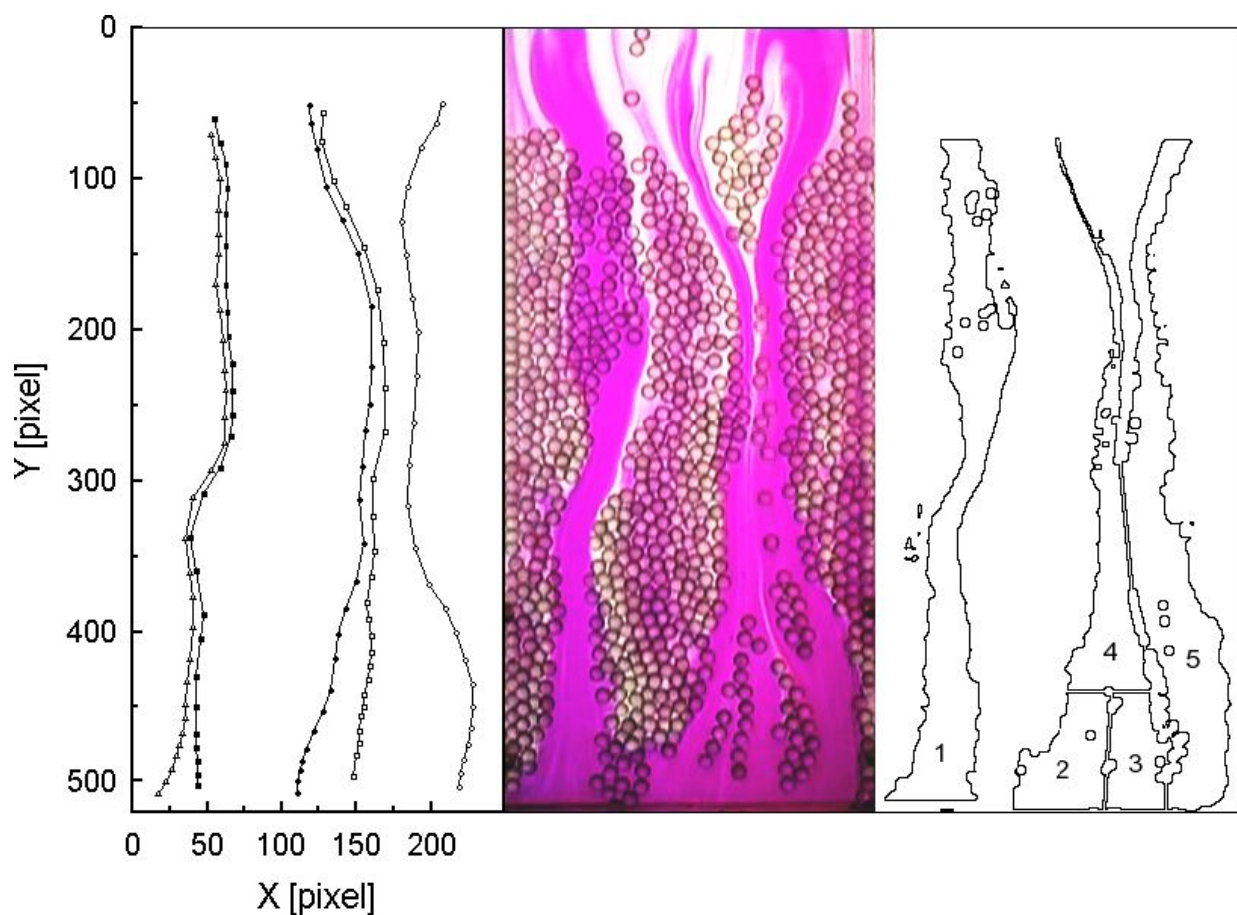
Tabulka 36: Popis kanálek pro systém B-PR-F-3a



Obrázek 42: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-4a

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	3,7198	6,9449	0,682	89,1773	9,0599
2	1,4382	4,2667	0,4292	98,2286	4,8094
3	1,9722	3,9445	0,6366	77,7512	4,4748
4	1,9396	2,8156	0,8771	100,554	3,5862
5	2,032	3,9132	0,6611	179,4053	4,3547
6	3,7524	4,929	0,9693	78,4105	5,8461
7	1,9491	3,1712	0,7826	103,0281	4,0615
8	8,7258	9,4246	1,1788	93,465	13,4089
9	9,5975	6,389	1,9127	59,9604	6,7375

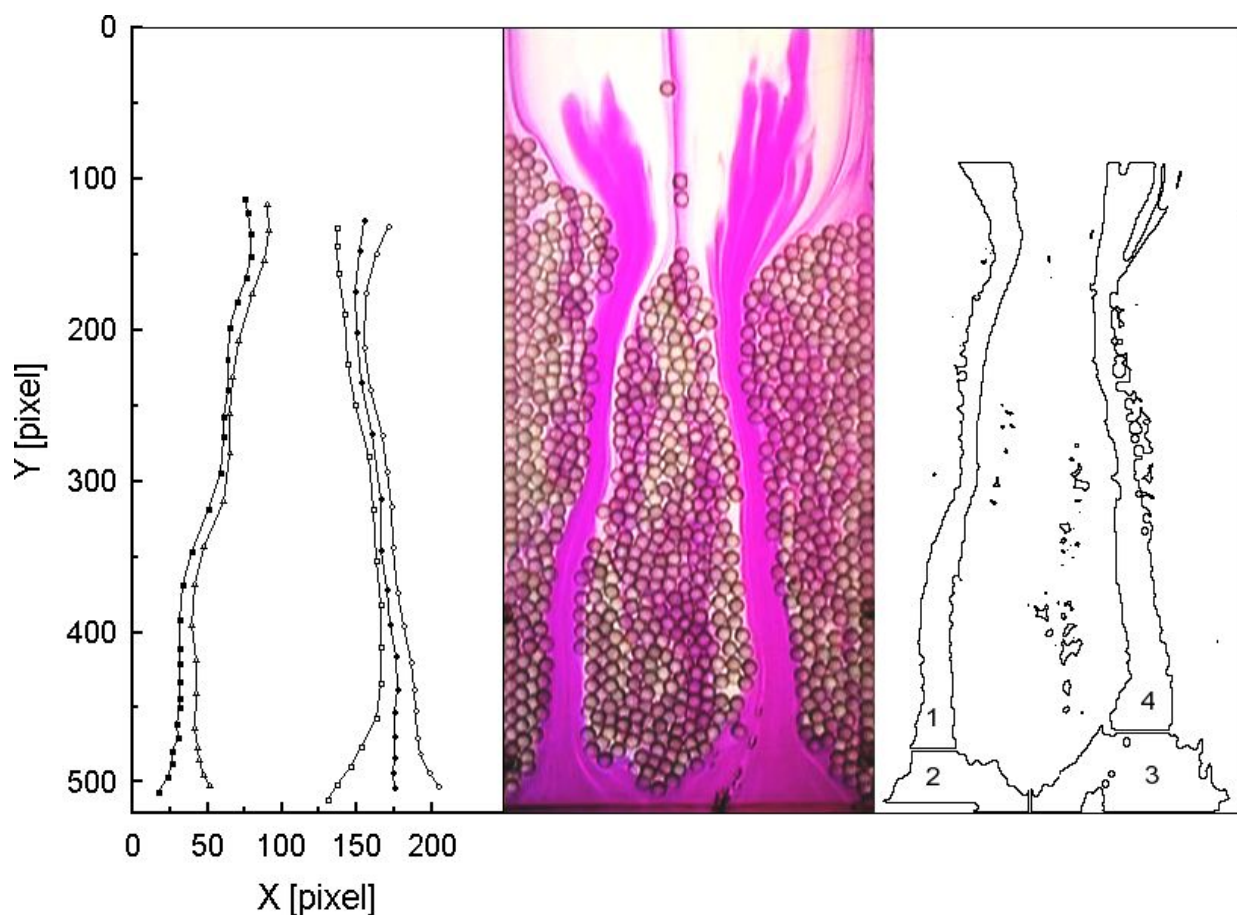
Tabulka 37: Popis kanálek pro systém B-PR-F-4a



Obrázek 43: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-5b

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	12,2023	13,8079	1,1252	86,5692	14,2866
2	3,4282	2,7501	1,5872	60,1853	3,1688
3	2,3687	2,5946	1,1624	91,6813	2,6836
4	6,1987	8,3184	0,9488	91,388	12,066
5	11,5896	11,4596	1,2877	95,6378	14,3951

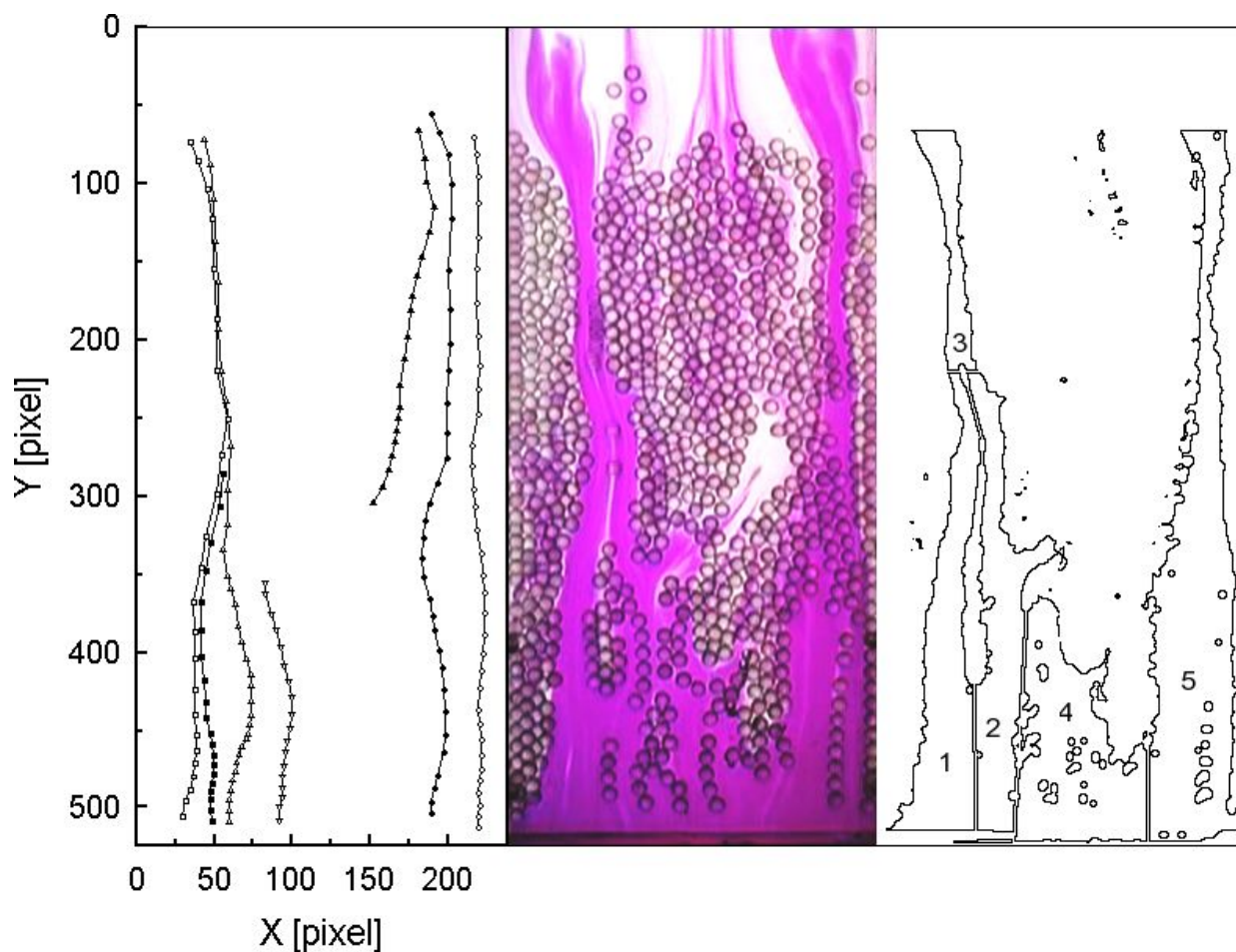
Tabulka 38: Popis kanálek pro systém B-PR-F-5b



Obrázek 44: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-6b

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	6,655	12,2127	0,6938	82,4281	12,71
2	2,3991	2,7433	1,1135	170,7363	3,0207
3	4,729	3,6007	1,6722	1,9339	4,223
4	9,5619	11,878	1,025	92,7216	12,2825

Tabulka 39: Popis kanálek pro systém B-PR-F-6b



Obrázek 45: Trajektorie obarvené kapaliny, barevný snímek a upravený snímek ze systému B-PR-F-7b

č. objektu	A [cm ²]	H [cm]	W [cm]	α [°]	d_F [cm]
1	7,3675	9,0848	1,0326	86,4764	9,9628
2	6,5847	8,5255	0,9834	90,2973	9,9354
3	2,1865	5,3579	0,5196	95,4987	5,2887
4	8,6972	4,8222	2,2964	104,2572	5,7271
5	14,9469	13,2586	1,4354	87,9899	15,4068

Tabulka 40: Popis kanálek pro systém B-PR-F-7b