



PROUDĚNÍ KOMPLEXNÍCH SMĚSÍ V POTRUBÍ

Vojtěch Pěník

Anotace: Článek se zabývá prouděním komplexních kapalin v potrubí. Obsahuje výsledky měření neneutonských kapalin s obsahem pevné fáze na laboratorním trubním okruhu, viskozimetru a ERT. Experimentální data jsou porovnána s matematickými modely a pozornost je zaměřena na důležité parametry ovlivňující strukturu proudění v potrubí, zejména v turbulentní oblasti.

Klíčová slova: Komplexní směs, neneutonská kapalina, laminární a turbulentní proudění v potrubí, koncentrační profil

Vojtěch Pěník: TURBULENT FLOW OF NON-NEWTONIAN MIXTURES WITH YIELD STRESS

Annotation: This paper deals with complex mixture flow in the pipe. Paper contain a results of measured flowcurves of non-newtonians mixtures on the laboratory pipe-loop, in the viscotester and ERT. Goal of the measurement was to extend database of flowcurve of various liquid with appropriate rheological parameters and their comparison with the predictive mathematical models. Special attention is paid for internal flow structures in turbulent regime.

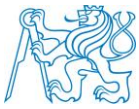
Key words: complex mixture, non-Newtonian flow, yield stress, laminar, turbulent flow

1. ÚVOD

Proudění komplexních směsí je poměrně běžným jevem vyskytujícím se v mnoha odvětvích průmyslu (těžba, svod odpadních vod, zpracování potravin,...). Za komplexní směs jsou považovány směsi s nosnou kapalinou neneutonského typu s obsahem pevné fáze. Heterogenní směs je směs, kde nosné médium tvoří newtonská kapalina, např. voda. Pevná fáze může být, a často bývá, zastoupena více frakcemi. I přes hojné využití v praxi stále neexistují přesné, a hlavně univerzální rovnice pro výpočet tlakových ztrát třením, jako je tomu u kapalin newtonských. Tento pomalejší vývoj, oproti newtonským kapalinám, je zapříčiněn zejména širokou škálou typů neneutonských kapalin a vyšším stupněm komplexity a rozdíly v jejich chování. V současné době jsou sice k dispozici rovnice pro výpočet tlakových ztrát třením, ale jen pro některé z mnoha typů neneutonských kapalin. Pro modelování komplexních směsí lze použít newtonské modely, do kterých je nutné implementovat vliv reologických parametrů neneutonských směsí. Ztráty třením ovlivňuje zejména rozdělení koncentrací částic v proudu. Je proto potřeba porozumět vlivu jednotlivých parametrů, které rozdělení koncentrací částic, a tím proudění jako celek, ovlivňují.

2. MATEMATICKÉ MODELY

Matematické modely popisující proudění neneutonských kapalin již existují. Vzhledem ke složitosti problematiky je ale vhodné jejich platnost ověřovat na nových experimentálních datech. Protože neneutonské kapaliny, na rozdíl od vody, tečou často v laminárním režimu i ve vyšších rychlostech, používají se modely zvláště pro laminární a zvláště pro turbulentní režim proudění. V tomto článku bylo pracováno pro každý typ proudění s jedním modelem. Laminární proudění je popsáno pomocí rozšířené Buckinghamovy rovnice [3]. Turbulentní proudění je popsáno modelem Wilson and Thomas [4], kde různé typy kapalin jsou zohledněny ve výpočtu zdánlivé viskozity [3]. Matematické modelování komplexních směsí v literatuře popsáno prakticky není. Existují ale modely pro predikci ztrát třením pro newtonské směsi, například čtyřkomponentní model [7.], který je primárně určený pro proudění heterogenních směsí. Základní rovnice modelu má následující podobu.



$$dp/dx_{tot} = dp/dx_c + dp/dx_p + dp/dx_h + dp/dx_s, \quad (1)$$

Každý člen rovnice představuje frakci určité velikosti, přičemž každá frakce se podílí na celkovém odporu proudící směsi. Výsledný hydraulický gradient je pak dán součtem gradientů všech 4 komponent modelu. V případě, že některá frakce ve směsi zastoupená není, lze ji vypustit. Rozsah velikosti částic pro zatřídění do daného komponentu modelu je detailněji popsán v [7]. Pro nenewtonské komplexní směsi ale podobný model do nedávné doby neexistoval. V roce 2015 v [7] byla pro 4-komponentní model navržena modifikace pro nenewtonskou nosnou kapalinu. Komponenta, zohledňující příspěvek nejmenší frakce, je považována za nosnou nenewtonskou kapalinu na základě teze, že částice jsou již natolik malé, že nejsou proudem nesené, ale že přímo s kapalinou samotnou tvoří nenewtonskou nosnou kapalinu. Na základě modifikace se model stává tříkomponentním, základní rovnice je ve tvaru

$$dp/dx_{tot} = k_1 * dp/dx_c + k_2 * dp/dx_p + k_3 * dp/dx_h, \quad (2),$$

kde k_1 , k_2 , k_3 jsou parametry modelu.

Tříkomponentní model se ale zabývá jen tlakovými ztrátami jako celku. Neřeší důležitý jev, který k celkovým ztrátám významně přispívá. Jedná se o rozdělení koncentrace částic.

Rozdělení koncentrace částic v proudící komplexní směsi je jedním z hlavních faktorů ovlivňující celkový odpor směsi. Pro proudění heterogenních směsí v tlakových potrubích se v literatuře v zásadě objevují dva typy modelů: turbulentně-difuzní modely založené popisu interakce nesených částic s turbulentními víry jako dominantního mechanismu podpory částic a kolizní modely založené na kinetické teorii směsí a uvažující kontakty (srážky) mezi částicemi za dominantní mechanismus podpory částic v proudící kapalině. Modely založené na kinetické teorii jsou ve stadiu rychlého vývoje, ale zatím jsou příliš komplikované pro použití v praxi. Pozornost praktičtější zaměřeného výzkumu se tedy zatím soustřeďuje hlavně na rozvoj turbulentně-difuzního modelu.

Původní model odvozený nezávisle Schmidtem a Rousem ve 20. a 30. letech zavedl difuzní součinitel proudící kapaliny jako klíčový parametr modelu. V modelu dále vystupuje usazovací rychlost částice, lokální objemová koncentrace částice a výšková poloha místa lokální koncentrace ve svislici proudu. Model v původní podobě predikoval exponenciální průběh rozdělení částic v proudu. Pozdější pozorování ukázala, že takový průběh se vyskytuje jen v proudění velmi nízké koncentrovaných směsí a není tudíž vhodný pro proudění směsí běžně se vyskytujících v potrubích dopravujících heterogenní směsí. Jako vhodná úprava modelu pro použití při proudění vysoce koncentrované směsí se ukázala náhrada usazovací rychlosti jedné částice usazovací rychlostí rušené sedimentace. Model Schmitd and Rouse [12] s implementovaným efektem rušené sedimentace popisuje rovnice

$$\frac{dc}{dy} = \frac{-v_t}{\varepsilon_s} \cdot (1-c)^m \cdot c \quad (3),$$

kde m je exponent dle Richardson-Zaki rovnice pro výpočet rušené sedimentace částic [9].



Součinitelem difuzivity částic ε_s se již dříve zabývali např. Gillies and Shook v [10]. V newtonských směsích částic s vodou je difuzivita určena jako konstanta pomocí součinitele bezrozměrné difuzivity.

$$\frac{\varepsilon_s}{u_* \cdot R} = 0,08 \quad (3),$$

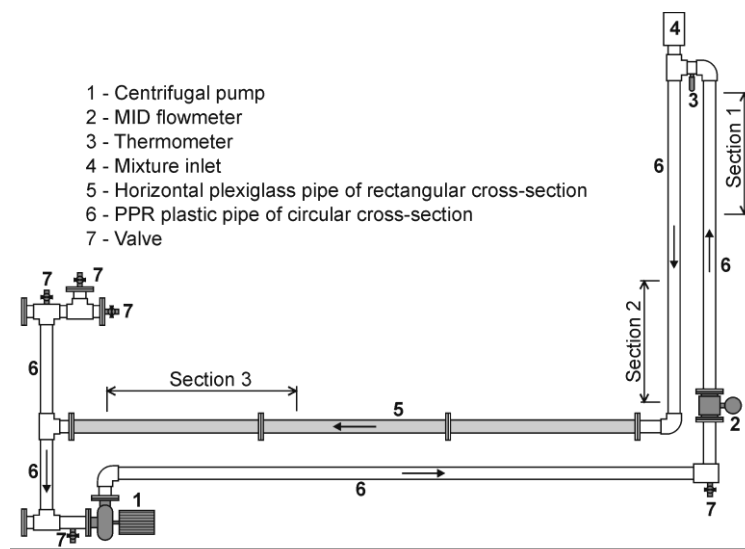
kde u_* je třecí rychlost a R je poloměr potrubí.

Hodnota bezrozměrné difuzivity je ale vztažena provedených experimentům s jemným pískem. Pro větší částice bude hodnota jiná. Pro newtonské kapaliny žádná konkrétní hodnota určená není ani v jiné literatuře. Z toho důvodu je potřeba se součinitelem difuze podrobněji zabývat.

3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

Experimentální trubní linka

Měření byla prováděna na trubním okruhu DN50 znázorněném na Obr. 1, který je umístěn ve Vodohospodářské laboratoři Českého vysokého učení technického v Praze. Na trubní jsou tři úseky pro měření tlakových rozdílů. Sekce 1, 2 (délka 1,3 m) je vzestupná, resp. sestupná větev a sekce 3 je umístěna na horizontální části potrubí (délka 1 m). Diferenciální tlaky jsou měřeny diferenciálními manometry Fischer Rosemount DP1151 ve vertikálních sekcích (sekce 1 a 2) potrubí z PE (DN 51,4 mm) a diferenciálním manometrem Siemens sitrans P DSIII v horizontální sekci (sekce 3) potrubí z plexiskla (DN 50,0 mm). Celková délka horizontální sekce z plexiskla je 6,20 m. Tvoří ji 3x2m dlouhé a 1x0,2m dlouhé potrubí. Celková délka okruhu je 22,96 m a objem 45,08 l. Celkový objem, včetně příslušenství (plnicí nádrž, etc.) je 68,2 l. Pro měření průtoků je používán elektromagnetický průtokoměr Krohne Optiflux 5000, který je osazen ve vertikální sekci okruhu nad výstupním otvorem odstředivého čerpadla. Čerpadlo EBARA 3M 40-200/7,5 kW je poháněno elektrickým motorem s frekvenčním měničem TECO GD100-011G-4 11kW. Parametry čerpadla jsou: výkon 7,5 kW, průměr oběžného kola 200 mm, maximální průtok 11,67 l/s. Teplota proudícího média je měřena ve vertikální části potrubí. Reologické parametry testovaných kapalin jsou měřeny v rotačním viskozimetru HAAKE Viscotester VT550.



Obr. 1 Schéma laboratorní trubní linky

Koncentrace částic je měřena pomocí zařízení ERT, název je odvozen a anglického názvu Electrical Resistance Tomography. Přístroj má kolem potrubí rozmístěné elektrody, na kterých je

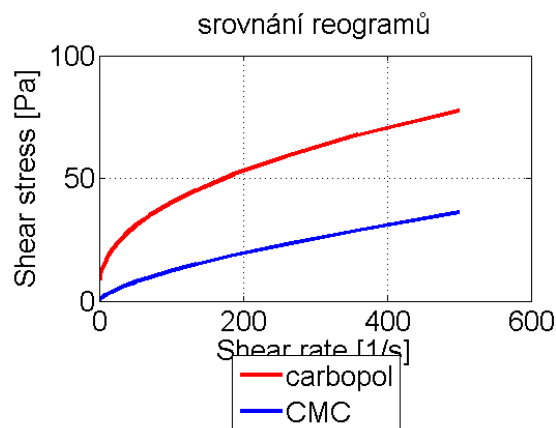


zaznamenáváno napětí. Přístroj získává informace o bodových vodivostech postupným měřením napětí odporu na různých trajektoriích elektrického proudu napříč potrubím. Následná měření a příkony jsou použity jako okrajové podmínky pro řešení odporového pole uvnitř potrubí. Vztah mezi odporem suspenze a bodovými koncentracemi je dán Maxwellovou rovnicí, díky které se efektivně získá koncentrace pevných částic v určitém čase. Na laboratorní trubní lince jsou umístěny v horizontální části celkem 3 ERT snímače-prstence. Každý má 16 elektrod. Prstence jsou spojeny s řídicí jednotkou UCT, která je ovládána pomocí softwaru UCT Tomography. K vyhodnocení koncentračních profilů ze změřených vodivostí je použita metoda EIDORS.

Testovaná neneutonská kapalina

Jako první zástupce neneutonských kapalin byl vybrán carbopol. Jedná se o polymer kyseliny polyakrylové v podobě velmi jemného prášku, který se při styku s vodou rozpouští. Po smíchání dosahuje výsledný roztok hodnot pH mezi 4,5-5, v závislosti na koncentraci prášku. Viskozita roztoku je velmi citlivá právě na pH. Nejvyšší roztok viskozity dosahuje v rozmezí pH 7-9. U hodnot nižších než 7 a vyšších než 9 viskozita rapidně klesá. Pro dosažení uvedených ideálních hodnot pH se do carbopolu přidává zásada, v našem případě roztok hydroxidu sodného (NaOH). Konečný roztok carbopolu je tříparametrová neneutonská kapalina typu Herschel – Bulkley, jejíž viskozitu lze popsat pomocí tří reologických parametrů τ_y , K , n .

Jako druhý zástupce neneutonské kapaliny byla vybrána CMC (Carboxymethyl cellulose), jedná se o kapalinu typu power-law, která je určena dvěma reologickými parametry K a n . Počáteční napětí CMC nemá, to je patrné ze srovnání reogramů obou testovaných kapalin, viz Obr. 2.



Obr. 2 Srovnání reogramů carbopolu a CMC

Jeden z hlavních důvodů výběru uvedených nosných kapalin je jejich čírost. Během experimentů je pak možné vizuálně pozorovat proudění v potrubí. To je významné zejména v případech, kdy se v nosné kapalině nachází pevná fáze. Neneutonské látky, vyskytující se v praxi, jsou převážně neprůhledné.

Testovaná pevná fáze

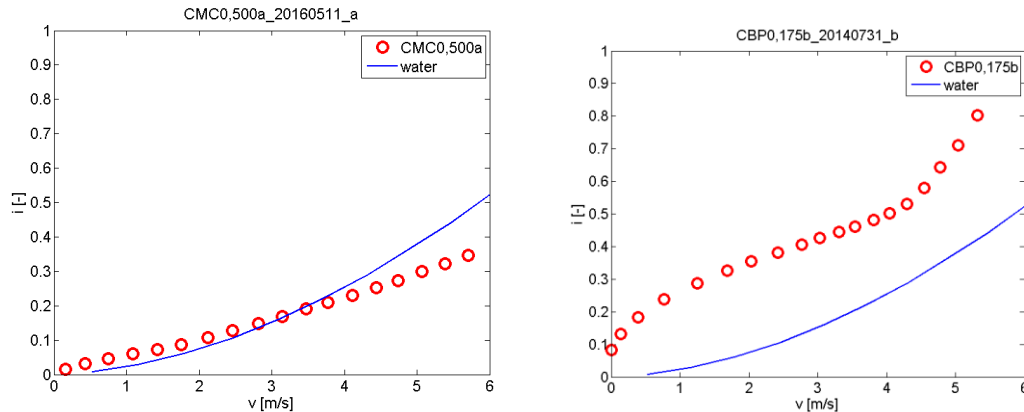
Jako pevná fáze byly použity technické kuličky o průměru efektivního zrna $d_e=1,5$ mm.

Měřené veličiny a parametry proudění

Databáze experimentálních dat byla měřena a ukládána pro každý nastavený průtok dané i-v křivky. Uváděná rychlost proudění je vypočítána podílem změřeného průtoku ve vertikální části potrubí a průtočnou plochou. Rozdíl snímaných tlaků byl měřen v horizontální části potrubí a následně byl přepočítán do hydraulických gradientů. Koncentrační profily ERT byly měřeny v každém bodě konkrétní i-v křivky. Objemová koncentrace C_v byla určena z podílu známého objemu částic v lince a známého objemu linky. Ke každému bodu je známa rovněž aktuální teplota směsi. Reologické parametry kapaliny byly určovány vždy před a poměření daného testu, případně byly odebírány



vzorky i v průběhu měření. Typický výstup z měření je ve formě i-v křivky uveden na následujícím Obr 3. Další výstupy jsou uvedeny dále v článku. Testované kapaliny byly označeny zkratkami CBP = carbopol, a CMC. Čísla za označením značí koncentraci prášku ve vodě, čím vyšší číslo, tím vyšší vazkost. Hodnoty čísel mají u každé kapaliny z hlediska konečné viskozity jinou váhu.

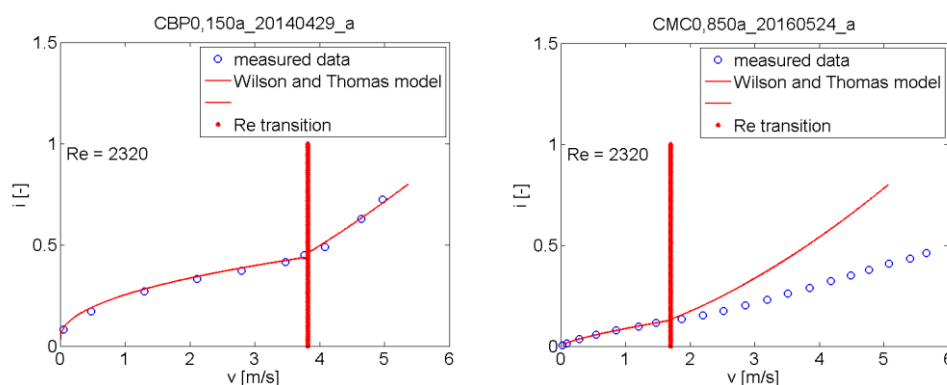


Obr. 3 Typický výstup z měření – i-v křivka testované směsi ve srovnání s i-v křivkou vody

4. POROVNÁNÍ TEORIE S VÝSLEDKY

Porovnání testovaných nosných kapalin bez pevné fáze

Získaná experimentální data porovnaná s predikčními modely dávají dobrou shodu. V laminární oblasti rozšířená Buckinghamova rovnice prokládá změřená data ve velmi dobré shodě v případě carbopolu i CMC. Rovnice je však velmi citlivá na správně změřené reologické parametry kapalin. Model Wilson and Thomas v turbulentní oblasti proudění prokládá data velmi dobře v případě tokové křivky carbopolu. V případě CMC, i přes úpravu modelu pro typ kapaliny power-law, nikoli. Ze změřené křivky je patrné, že v turbulentní oblasti klade CMC menší odpor než voda. V literatuře [11] je tento jev popsán jako drug reduction effect, kdy newtonská kapalina má tu vlastnost, že při zvyšující se rychlosti tlumí turbulentní víry, a tím pak klesá i celkový odpor kapaliny. V modelu Wilson and Thomas drug reduction effect není implementován. Tím je zdůvodněno, proč jsou data v turbulentní oblasti predikována s výrazně vyšším odporem, než byl skutečně změřen, viz Obr 4.

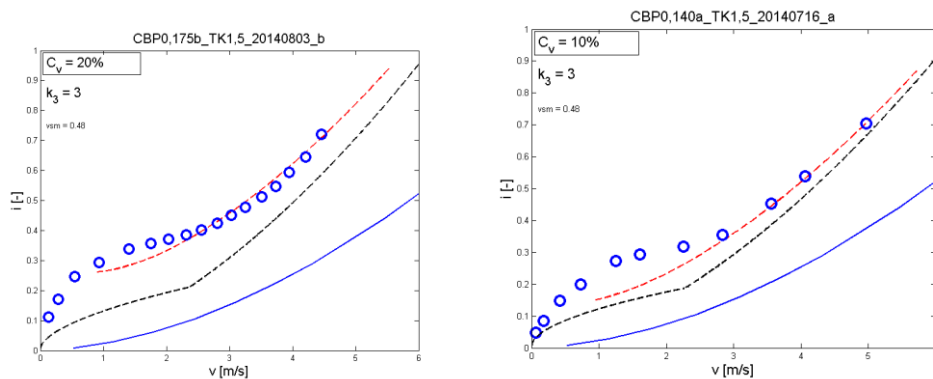


Obr. 3 Porovnání změřených dat s predikčním modelem Wilson and Thomas, červeně tučně je vyznačena hranice mezi laminární a turbulentní oblastí

Porovnání testovaných nosných kapalin s obsahem pevné fáze

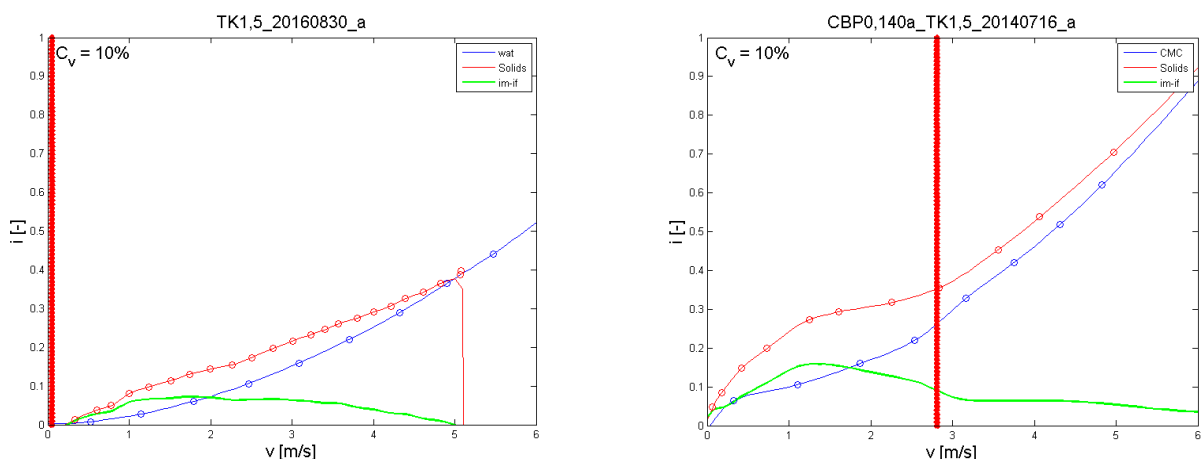


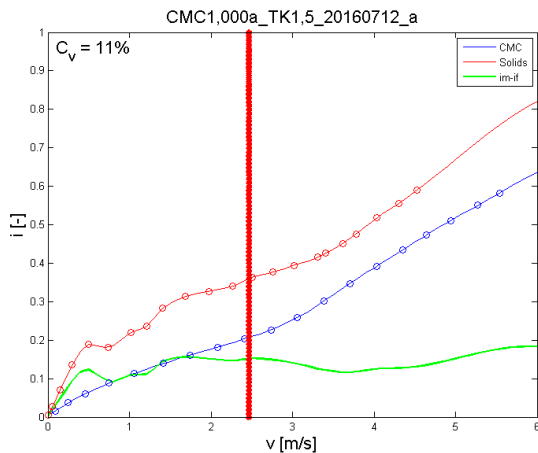
Tokové křivky komplexních směsí byly porovnány s tříkomponentním modelem na Obr. 4. Protože pevnou fází tvořily pouze technické kuličky TK1,5, byla zanedbána část první komponenty modelu představující nejjemnější frakci a druhá komponenta modelu. Hodnota koeficientu k_1 byla nastavena na hodnotu 1. To znamená, že nosná kapalina není dále ovlivněna nejjemnějšími částicemi a gradient je spočten pomocí modelu Wilson and Thomas. Koeficient k_2 byl nastaven na hodnotu 0. Vzhledem k velikosti testovaných částic byl model kalibrován pouze hodnotou k_3 . V obou případech vyšla hodnota $k_3=3$. Jde ale o hodnotu značně vysokou. Z fyzikálního hlediska by měla být hodnota koeficientu rovna 1, to znamená, že model pracuje správně bez nutnosti korekcí empirickými parametry. Výsledná hodnota $k_3=3$ značí, že samotné rovnice modelu predikují výrazně nižší ztráty, než byly naměřeny. To je v budoucnu potřeba ověřit na více experimentálních datech.



Obr. 4 Porovnání změřených dat s predikčním modelem Wilson and Thomas – černě, červeně s tříkomponentním modelem s kalibrovanou hodnotou koeficientu k_3 .

Vyhodnocení vlivu pevných částic je ukázáno na experimentálních datech na Obr 5. Na nich je patrné, že v případě carbopolu a vody je vliv částic se zvyšující se rychlostí klesající. V případě CMC je patrné, že vliv částic nevykazuje klesající ani stoupající tendenci a vliv částic se jeví jako konstantní. To je pravděpodobně způsobeno „drug reduction“ efektem, který ale v případě komplexních směsí zkoumán doposud nebyl. Pokud ale CMC tlumí turbulence, pak je tento jev logický. Vliv částic na celkový odpor směsi je na následujících grafech zobrazen pro koncentraci $c_v=10\%$ V/V.





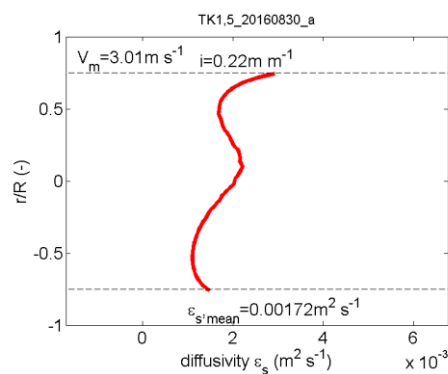
Obr. 5 Vliv pevných částic na celkový odpor směsi, červeně – komplexní směs, modře – samotná nosná kapalina komplexní směsi, zeleně – vliv pevných částic

Se správným určením vlivu částic na celkový odpor směsi souvisí i rozdělení koncentrace částic, které je důležitou součástí proudění utvářejícího jeho strukturu.

5. VYHODNOCENÍ DIFUZIVITY ČÁSTIC Z KONCENTRAČNÍHO PROFILU

Vyhodnocení difuzivity z koncentračního profilu

Rozdělení koncentrace částic v proudu směsi je jedna z nejdůležitějších vlastností v proudu, které je potřeba porozumět. Výsledné rozdělení koncentrací dle výše popsaného modelu Schmidt and Rouse [12] ovlivňují dva parametry, které jsou spolu úzce spjaté, difuzivita ε_s a usazovací rychlost částice v_t . Výpočet usazovací rychlosti částic je v případě newtonských nosných látek dle zavedených rovnic [2]. Následně je pak pomocí turbulentně difuzního modelu při známé usazovací rychlosti možné vyhodnotit součinitel turbulentní difuze ε_s . Průběh difuzivity je vidět na Obr. 6 níže.



Obr. 6 Difuzivita částic TK1,5 mm pro newtonskou nosnou kapalinu - vodu

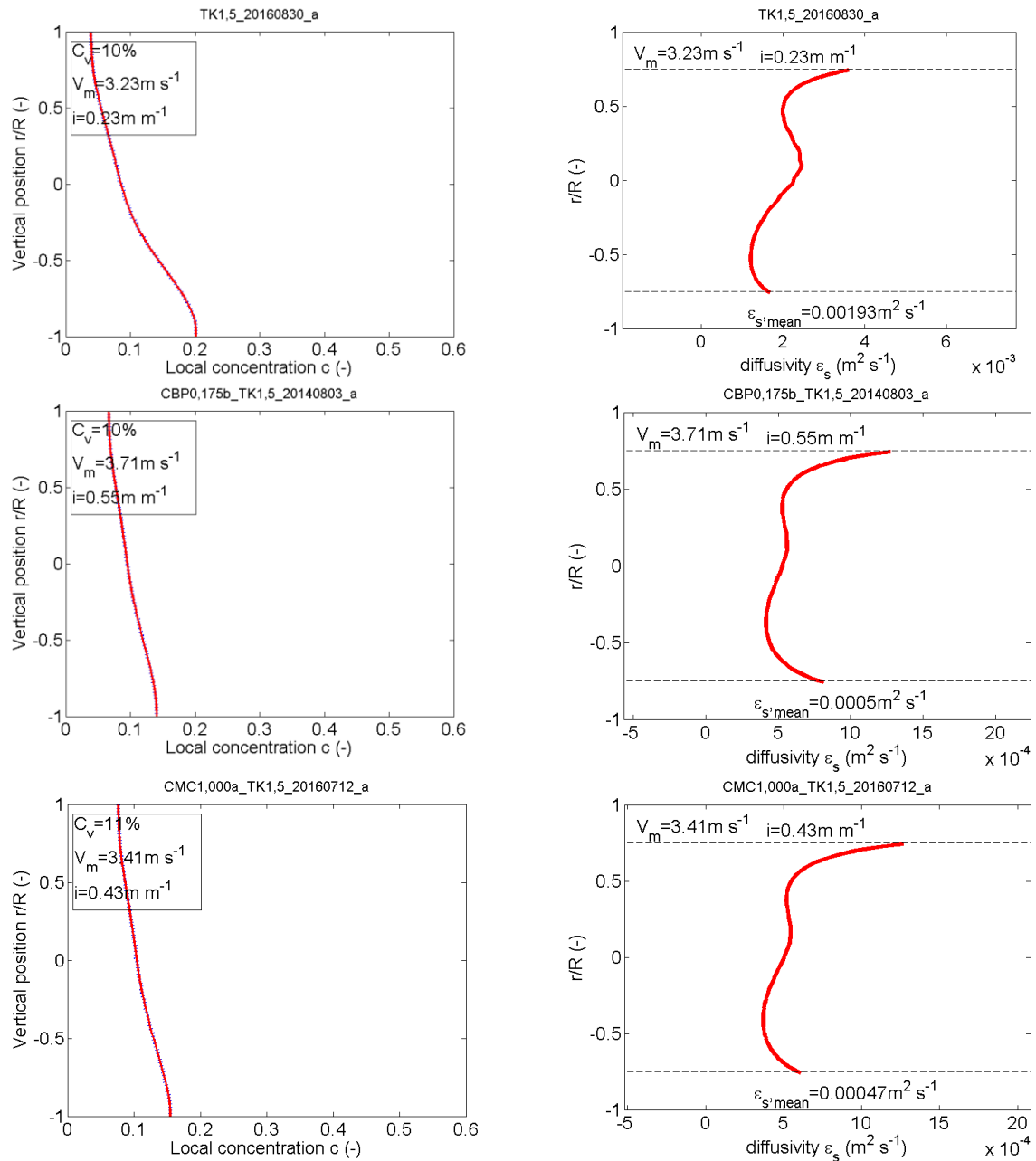
V případě proudění neneutronských směsí je výpočet usazovací rychlosti, vzhledem k proměnné viskozitě kapaliny po svislici proudu, složitější. Pro správný výpočet lokálních usazovacích rychlostí bylo nutné najít funkci popisující lokální rozdělení viskozit po výšce. K tomu byla použita funkce odvozena na základě numerické DNS simulace. Následně známé hodnoty lokálních viskozit pak bylo možné dosadit do výpočtu usazovací rychlosti za použití metody Haider-Levenspiel [13].

Vypočtené lokální usazovací rychlosti a změřeny koncentrační profily byly dosazeny jako vstupy do turbulentně difuzního modelu, z kterého následně byly vyhodnoceny průběhy součinitele turbulentní difuze.

Výsledky vyhodnocení průběhu difuzivit jsou, spolu s příslušnými koncentračními profily, na následujících grafech, viz Obr 7. Jako průměrná hodnota difuzivity byla určena hodnota v intervalu <-



0,5 R; 0,5 R>. V krajích potrubí jsou již hodnoty součinitele příliš ovlivněny třením kapaliny o stěnu, proto do průměru zahrnuty nebyly. Lokální rozdělení difuzivit se podařilo vyhodnotit pro případ vody, carbopolu i CMC. Jejich průběh po výšce proudu je vizuálně velmi podobný, liší se ale v průměrných hodnotách difuzivit. Pro vodu jsou hodnoty o řád vyšší, než pro carbopol a CMC. Hodnoty u neneutonských nosičů se dále mohou lišit v závislosti na konkrétních reologických parametrech. Pro přesnější kvantifikaci hodnot je ale potřeba vyhodnocení provést na více experimentálních datech.



Obr. 7 Difuzivita částic TK1,5 mm pro newtonskou nosnou kapalinu – vodu, neneutonskou carbopol a CMC

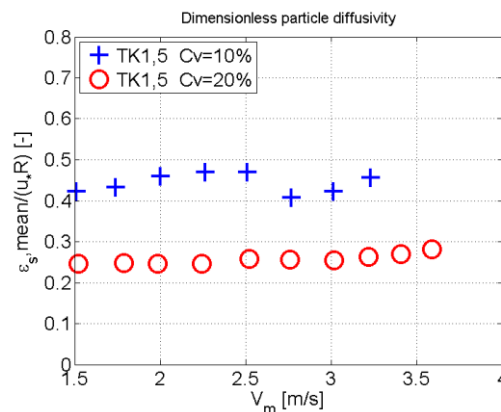


Vyhodnocení bezrozměrné difuzivity

Součinitel bezrozměrné difuzivity byl získán normalizací $\varepsilon_{s,mean}$ součinem třecí rychlosti a poloměru potrubí $\varepsilon_{s,mean}/(u_* \cdot R)$. Třecí rychlost byla spočítána ze změřeného hydraulického gradientu i za použití rovnice 4.

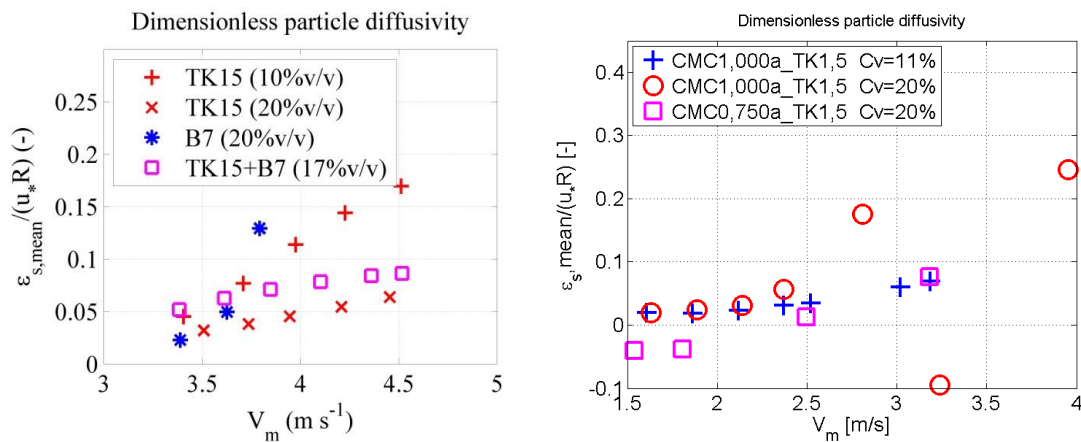
$$u_* = \sqrt{g \frac{D}{4} i} \quad (4)$$

Bezrozměrné difuzivity pro jednotlivé změřené i - v křivky jsou vyneseny v následujících grafech. V případě vody jako nosného média se potvrdilo, že bezrozměrná difuzivita $\varepsilon_{s,mean}/(u_* \cdot R)$ není závislá na rychlosti proudění, a je tedy konstantní, viz Obr. 8. Absolutní hodnoty, v porovnání s [8] a [10], dosahují vyšších hodnot. Z grafu je dále zjevná závislost na koncentraci částic v potrubí, kdy s nižší koncentrací má součinitel vyšší hodnoty. To nepotvrzuje závěry uvedené [8] a [10]. Do budoucna je vhodné vyhodnotit součinitel difuzivity na dalších experimentálních datech, případný rozpor potvrdit nebo vyvrátit.



Obr. 8 Bezrozměrná difuzivita – newtonská kapalina

V Obr. 9, naproti tomu, vynesení bezrozměrných difuzivit částic u neneutonských kapalin, carbopolu i CMC vykazuje závislost na rychlosti proudění, kdy se s rostoucí rychlostí hodnoty zvyšují. Dále je zjevná závislost na koncentraci částic i reologických parametrech nosných kapalin. Absolutní hodnoty bezrozměrného součinitele jsou ale stejného řádu jako u newtonských kapalin.



Obr. 9 Bezrozměrná difuzivita – neneutonské kapaliny, carbopol a CMC



6. ZÁVĚR

Turbulentní difuzivita byla vyhodnocena z experimentálně změřených i-v křivek komplexních směsí a příslušných koncentračních profilů za pomoci turbulentně difuzního modelu Schmidt and Rouse. Vyhodnocení bylo provedeno pro částice TK1,5 o průměru 1,5 mm pro newtonské (voda) a neneutonské nosné kapaliny (carbopol a CMC). Bylo zjištěno, že bezrozměrná turbulentní difuzivita je stejného řádu u newtonských i neneutonských kapalin. U newtonských dosahuje vyšších absolutních hodnot, je nezávislá na rychlosti proudění. Naproti tomu, v případě neneutonských nosných kapalin, je bezrozměrná difuzivita závislá na rychlosti proudění, objemové koncentraci a reologických parametrech. Vyhodnocené hodnoty $\varepsilon_{s,mean}/(u_*^*R)$ mohou být v budoucnu použity v turbulentně difuzním modelu pro predikci 1-D koncentračních profilů.

V rámci práce byl otestován tříkomponentní model pro výpočet ztrát třením proudící komplexní směsi. Model proložil data v turbulentním režimu v dobré shodě, ale bylo potřeba pomocí parametru k_3 výrazně zvýšit vliv pevné fáze na celkový odpor směsi. Vlivem pevné fáze a jejím zakomponováním do modelu je potřeba se dále zabývat. Model pro predikci ztrát třením pro čisté neneutonské kapaliny proložil změřené i-v křivky carbopolu v dobré shodě. Jediné úskalí je přesné určení reologických parametrů, pro které je potřeba mít vhodné vybavení. V případě CMC model neprokládal data v turbulentní oblasti. Jako důvod, proč tomu tak bylo, se nabízí vysvětlení, že CMC při vyšších rychlostech tlumí turbulence, tzv. drug reduction effect, a to snižuje celkový odpor kapaliny až natolik, že může mít menší odpor než čistá voda.

Stávající databáze experimentálně změřených dat byla rozšířena o další data. V současnosti už čítá 113 i-v křivek, z toho je 68 s obsahem pevné fáze. V databázi jsou obsažena data pro newtonské – heterogenní směsi i neneutonské – komplexní směsi. Vzhledem ke složitosti problematiky a získávání dat je dobré v budoucnu s experimenty dále pokračovat.

7. PODĚKOVÁNÍ

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS16/058/OHK1/1T/11, ROZDĚLENÍ KONCENTRACE ČÁSTIC V PROUDĚNÍ HETEROGENNÍCH A KOMPLEXNÍCH SMĚSÍCH

8. LITERATURA

- [1] WILSON, K. C., G. R. ADDIE, A. SELLGREN a R. CLIFT. *Slurry Transport Centrifugal Pumps*. 3. vydání. USA: Springer, 2006, s. 15-76. ISBN 978-0-387-23262-1.
- [2] MATOUŠEK, V. *Základy proudění neneutonských kapalin*. Slidy předmětu HY3V, ČVUT, Praha, 2013.
- [3] PULLUM, L. *Non-Settling Slurry Basics*. GIW Slurry Course, 2013.
- [4] WILSON, K. C. a A. D. THOMAS. 1985, *A new analysis of the turbulent flow of non-Newtonian fluids*. *Canad. J. Chem. Engrg.*, Vol 63, pp 539-546.
- [5] WILSON, K. C. a A. D. THOMAS. 1987, *New analzsis of non-Newtonian turbulent flow—yield-power-law fluids*. *Canad. J. Chem. Engrg.* Vol. 65, pp. 335-338.
- [6] Bakalářská práce Mikoláš Kesely, Vyhodnocování ztrát třením při proudění neneutonských směsí v potrubí



- [7] PULLUM L., CHRYSS A, GRAHAM L., MATOUSEK V, PENIK V., *Modelling turbulent transport of solids in non-newtonian carrier fluids applicable to tailings disposal*, 17T&S, 2015
- [8] V. Matoušek, J Hydrol Hydromech, 48(3), 180-196, (2000)
- [9] J. F. Richardson, W.M. Zaki, Sedimentation and fluidization, Part 1. Trans. I. Ch. E.,32, 35–53, (1954)
- [10] Gillies, R.G. a C.A. Shook (1994). Concentration distributions of sand slurries in horizontal pipe flow. Particulate Science and Technology. Vol. 12, pp. 45-69.
- [11] STEFFE J.F., Rheological methods in food process engineering, second edition, 1996
- [12] H. Rouse, Trans. ASCE, 102, 463–505, (1937)
- [13] Haider, O. Levenspiel, Powder Technol, 58(1), 63-70, (1989)



TURBULENT FLOW OF COMPLEX MIXTURES IN PRESSURIZED PIPE

Vojtěch Pěník

This paper deals with complex slurries flow in the pressurized pipe. Complex slurries means mixture consist of non-Newtonian carrier and solids of various fractions. Paper contains a results of measured flowcurves of non-newtonians mixtures on the laboratory pipe-loop, appropriate concentration profiles measured by ERT device and rheology parameters measured in the viscotester.

The paper deals with a flow behaviour of mixture composed of coarse glass-bead particles and non-Newtonian carrying liquid of Herschel-Bulkley and power-law type in a pressurized pipe. Essentially, there are two mechanisms governing support of particles in the flowing carrier: mutual inter-particle collisions and interaction of particles with carrier turbulent eddies. The turbulent support is quantified by a turbulent-diffusion model, which predicts a distribution of concentration of particles in the flow. In the model, the particle turbulent diffusivity is an important parameter dependent on a number of flow quantities, e.g. the carrier rheological parameters. In case of Newtonian carrier, the viscosity is the only rheological parameter and it is constant throughout the flow. In the non-Newtonian carrier, however, local values of the viscosity vary with the shear strain and so affect the particle diffusivity. The paper discusses experimental and analytical results for non-Newtonian mixture flows of measured rheological parameters and flow characteristics. Based on measured concentration profiles, a suitable method is used to determine the local particle diffusivity experimentally.

Further paper deal with comparison of models predicting pressure lost with experimentally measured data. For clear carriers is used extended Buckingham equation in laminar flow and Wilson and Thomas in turbulent flow. This model is in very good agreement with carbopol data sets, but is very sensitive to correct determination of rheology parameters. CMC data sets are not in good agreement, because there is mechanism called drug reduction effect, which reduced turbulent eddies in high velocities. Hence in high flow CMC has lesser losses than water. This effect is not implemented in any models. For complex slurries is used three compound model, which is analyzed on experimentally measured flow curves.

Experimental data sets were measured on a pipe loop located in the Water Engineering Laboratory of the Czech Technical University in Prague. Differential pressures are measured on two vertical sections and one on horizontal section. Pipe material of vertical sections is PE of diameter is 51.4mm, horizontal section is made from plexiglass pipe of diameter 50.0mm. The total length of loop 22.96m in the volume 45.08l. Total volume of the rig with all accessories (loading tank etc.) is 68.2l. For measuring of flow rate is used an electromagnetic flow meter Krohne Optiflux. The pump is EBARA 3M 40-200/7,5kW is driven by an electric motor with a variable frequency converter. Pump impeller diameter 200mm, maximum flow 11.67l/s, total head from 58m to 44m. The temperature of the flowing medium is measured in the vertical invert pipe. The rheology of fluids is tested on rotational viscotester. As a representant of Non-Newtonian fluids Herschel-Bulkley type was chosen polymer Carbopol, which has 3 parametres (τ_y , K , n), as representant of power-law type was chosen CMC. A big atvantage of those two liquids is transparency and quite simple preparation of solution of various concentrations. Transparency is very useful for visual observations of solids in Non-Newtonian mixtures flow. An ERT (Electrical Resistance Tomography) equipment was used to measure a distribution of particle concentration in the pipe. The equipment contained 3 rings located at 3 different locations along the transparent acrylic horizontal pipe. Each ring had 16 electrodes and was able to sense a tomographic image of conductivity distribution in one pipe cross section. The rings were connected with the UCT processing unit controlled by UCT Tomography software. The processed ERT data were further post-processed by EIDORS procedures.

The database of flowcurves was extended up to 113 data sets, from which 68 are with solids.