

30. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky



22.-24.6. 2011

Špindlerův Mlýn

Jednotlivý příspěvek ze sborníku



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI



evropský
sociální
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Vyšetření vlivu adhezního součinitele k na proudění kapalin s využitím fyzikálního a matematického modelování

Barbora FRODLOVÁ¹, Milada KOZUBKOVÁ², Lukáš ZAVADIL³, Simona FIALOVÁ⁴

¹ Ing. Barbora Frodlová, VŠB-TUO, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, barbora.frodlova@vsb.cz

² prof. RNDr. Milada Kozubková, CSc., VŠB-TUO, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, milada.kozubkova@vsb.cz

³ Ing. Lukáš Zavadil, VŠB-TUO, 17. listopadu 15/2172, 708 33 Ostrava-Poruba, lukas.zavadil@vsb.cz

⁴ Ing. Simona Fialová, Ph.D., VUT v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, fialova@fme.vutbr.cz

Abstrakt: Článek pojednává o možnosti numerického modelování proudění s uvažováním vlivu částečné smáčivosti stěn a o následném stanovení adhezního součinitele k , který definuje míru hydrofobnosti nebo naopak hydrofilnosti jednotlivých materiálů. Stanovení adhezního součinitele bude provedeno dvěma fyzikálními experimenty. Bude se jednat o měření tlakových ztrát v potrubí z různých materiálů při laminárním proudění a o vyšetření pohybu stékající kapky po nakloněné desce z různých materiálů. Výsledky experimentů budou poté porovnány s teorií částečně smáčivých stěn, kterou odvodil prof. Pochylý.

1. Úvod

Povrchy materiálů ovlivňují proudění kapalin, ať už svými fyzikálními vlastnostmi či povrchovou úpravou. Částečná smáčivost, v krajním případě nesmáčivost, je vlastnost, kdy kapalina špatně smáčí povrch druhé, v našem případě pevné, fáze. Kapalina tedy neulpívá na pevném povrchu. Zkoumání částečné smáčivosti povrchů je zajímavé z hlediska snižování ztrát při proudění kapalin. Vhodnou volbou materiálu či povrchovou úpravou částí hydraulických strojů a zařízení by se dalo docílit zvýšení jejich účinností.

Pojem smáčivost úzce souvisí s pojmy povrchové napětí a povrchová energie, což jsou mechanické projevy fázového rozhraní, jehož vlastnosti jsou ovlivňovány vlastnostmi všech stýkajících se fází. Při styku tří fází – pevné, kapalně a plynné, platí podmínka rovnováhy všech stýkajících se mezifázových energií – Youngova rovnice (1) [1].

$$\gamma_{SG} - \gamma_{SL} = \gamma_{LG} \cdot \cos \theta \quad (1)$$

Tvar kapky umístěné na pevný povrch je charakterizován úhlem smáčení θ , který svírá tečna k povrchu kapaliny s rozhraním pevná

látka-kapalina. Může nastat případ, kdy je úhel smáčení nulový, pak se jedná o dokonalé smáčení. Pokud se hodnota úhlu pohybuje mezi 0° a 90° , jedná se o dobré smáčení, nad 90° o špatné smáčení a při kontaktním úhlu rovnému 180° mluvíme o dokonalém nesmáčení.

Při dobrém smáčení, kdy kapalina ulpívá na povrchu, je relativní rychlost proudící kapaliny na povrchu tělesa nulová. Podmínka pro částečně smáčivé povrchy zahrnuje prokluzování kapaliny na povrchu tělesa, relativní rychlost kapaliny na stěně tedy není nulová. Takovou podmínku definoval téměř před 200 lety Navier (2) [2].

$$c = \beta \cdot \frac{dc}{dr} \quad (2)$$

kde β je délka skluzu nebo také skluzový součinitel. Pokud by byl nulový, pak rovnice vede na běžně užívanou okrajovou podmínku nulové rychlosti na povrchu. Rovnice však může řešit pouze rovinné proudění, není vhodná pro obecně zakřivené plochy.

Pro obecně zakřivené plochy ve styku s kapalinou platí vztah (3), kdy

předpokládáme, že vektor smykového adhezního napětí σ leží v rovině určené vektorem vnější normály k povrchu \mathbf{n} a vektorem rychlosti \mathbf{c} [3].

$$\sigma_A = (\sigma \times \mathbf{n}) \times \mathbf{n} = -k\mathbf{c} \quad (3)$$

kde k je adhezní součinitel [$\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]. Lze předpokládat, že vektor smykového adhezního napětí na částečně smáčivém povrchu je úměrný rychlosti kapaliny.

2. Fyzikální experimenty

Oba připravované fyzikální experimenty mají spolu s jejich numerickým modelováním za cíl stanovit hodnotu adhezního součinitele k pro různé materiály. Zaměřujeme se na dvě různé úlohy, a to měření tlakových ztrát v potrubí při laminárním proudění z odlišných materiálů, kde jsou vybrány materiály s různou hodnotou povrchové energie. Druhý experiment se týká vyšetření pohybu stékající kapky po nakloněné desce z různých materiálů. V následujících dvou bodech jsou experimenty popsány.

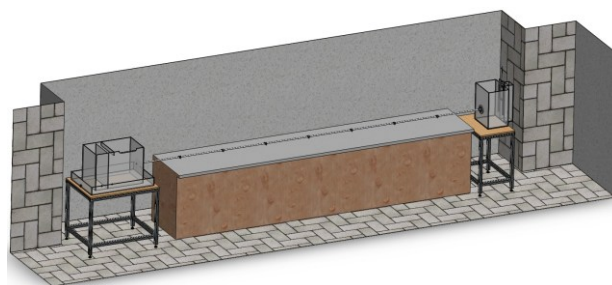
Měření tlakových ztrát v potrubí:

U potrubních systémů hrají třecí ztráty nemalou roli. Neovlivňuje je jen kvalita opracování povrchu, který se stýká s kapalinou, ale i to, nakolik je povrch materiálu hydrofobní. Experiment je proto zaměřen na měření třecích ztrát na vodní trati při laminárním proudění kapalin v potrubích různých materiálů, ať již klasických, jako je ocel či měď, tak materiálů z plastů, jako je např. PVC, PP, PE či PTFE.

Zkušební zařízení pro měření tlakových ztrát v potrubí bude sestaveno ze dvou nádrží a 5 m dlouhých trubek z různých materiálů, viz Obrázek 1.

Naměřené hodnoty poslouží pro porovnání výsledků s hodnotami dle empirických vztahů. Tyto naměřené a vypočtené hodnoty tlakových ztrát budou následně ověřeny numericky

s cílem otestovat okrajovou podmínku definující částečně smáčivý povrch a stanovit adhezní součinitel k pro použité materiály potrubí.



Obrázek 1: Vizualizace zařízení pro měření tlakových ztrát

Vyšetření pohybu stékající kapky po nakloněné rovině:

Tento experiment bude proveden ve spolupráci s VUT v Brně, kde působí prof. Pochylý, který odvodil vztahy pro částečně smáčivé stěny.

Vysokorychlostní kamerou bude snímán pohyb kapky po nakloněné rovině z různých materiálů a bude vyhodnocena rychlost pohybu kapky. Následně budou provedeny numerické výpočty, které budou tento pohyb kapky po nakloněné rovině simulovat. Tím se ověří okrajová podmínka pro částečně smáčivé povrchy pomocí UDF funkce v softwaru Fluent. Výsledky z numerického modelování se porovnají s teorií částečně smáčivých stěn prof. Pochylého. Na základě provedených fyzikálních a numerických experimentů se bude určovat adhezní koeficient k .

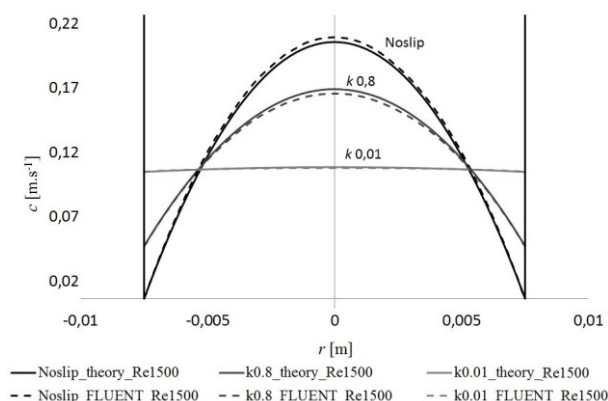
3. Numerické modelování

Naším cílem je ověřit možnost použití okrajové podmínky pro částečně smáčivé povrchy v softwaru Fluent. Okrajová podmínka se definuje pomocí UDF funkce a počítá se s jejím využitím jak ve 2D, tak i 3D úlohách. V současné době probíhá testování této okrajové podmínky na vybraných úlohách. Po jejím ověření bude numerických simulací využito na geometrie shodné s fyzikálními experimenty.

Vliv částečné smáčivosti povrchu na proudové pole v potrubí kruhového průřezu:

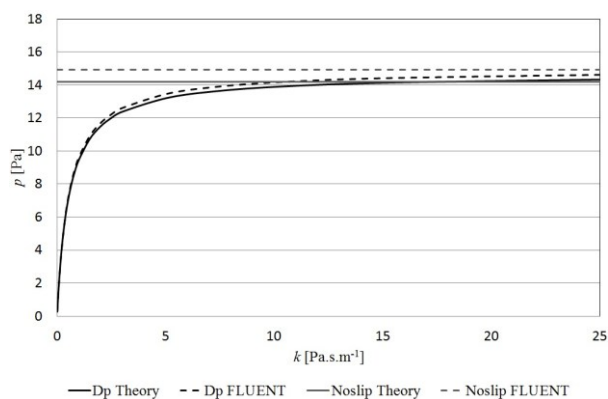
Jednou z vybraných úloh je modelování proudění v trubce o vnitřním průměru 15 mm a délce 1000 mm. Proudění je uvažováno jako laminární, nestlačitelné, izotermní a stacionární. Bylo vytvořeno několik výpočetních sítí, jako medium byla zvolena voda.

Obrázek 2 ukazuje podobu rychlostních profilů z 3D simulací jak pro smáčivý povrch, tak pro částečně smáčivý povrch při různých hodnotách adhezního součinitele k a při Reynoldsově číslu $Re = 1500$. Shoda výsledků z teorie s výsledky z Fluentu je zřejmá a zcela dostačující.



Obrázek 2: Porovnání rychlostních profilů pro výsledky z empirických rovnic a z Fluentu [7]

Dalším sledovaným parametrem je tlakový spád na modelovaném potrubí. Obrázek 3 srovnává vypočtené hodnoty s hodnotami z numerického experimentu při výpočtech na 3D geometrii.



Obrázek 3: Porovnání tlakového spádu pro smáčivý a částečně smáčivý povrch při $Re = 1500$ [7]

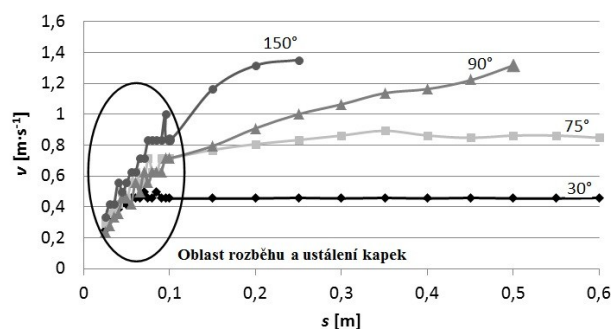
Závislost tlaku na adhezním součiniteli k má exponenciální průběh. Odchylka tlakového spádu z numerického experimentu v porovnání s teorií nepřekročila 5 %.

Proudění bylo řešeno jak ve 2D tak ve 3D, přičemž oba výsledky prokázaly dobrou shodu s výsledky z empirických předpokladů.

Vyšetření rychlosti pohybu kapky po nakloněné rovině:

Pro vyšetření samovolného pohybu kapky po nakloněné rovině byly pro kapky s různými kontaktními úhly použity totožné vstupní podmínky. Výpočty proběhly ve 2D, délka roviny byla 0,6 m a její naklonění 45°. Byl použit vícefázový VOF model (Volume Of Fluid) a dvourovnicový model turbulence $k-\varepsilon$ RNG. Do výpočtů byly zadány dvě fáze, vzduch a voda, o mezipovrchovém napětí 0,0727 N.m⁻¹.

Obrázek 4 znázorňuje závislost rychlosti pohybu kapek s různými kontaktními úhly na ujeté dráze. Jev změny v rychlosti a jejího strmého nárůstu na počátku dráhy vykazovaly všechny kapky. Jedná se o dobu, kdy kapka „pruží“ a přechází do tvaru předepsaného vstupními parametry. Při vyhodnocování rychlostí pohybu kapek je nutné neuvažovat tuto první fázi pohybu kapky, které je dlouhá asi 0,1 až 0,15 m.



Obrázek 4: Závislost rychlostí pohybu kapek na ujeté dráze s vyznačenou oblastí rozběhu a ustálení kapky

Kapky s příliš velkým kontaktním úhlem (90° a 150°), které si lze představit na superhydrofobním materiálu, se v průběhu pohybu rozpadly na více menších kapek. Z grafu lze vyčíst závislost rychlosti pohybu

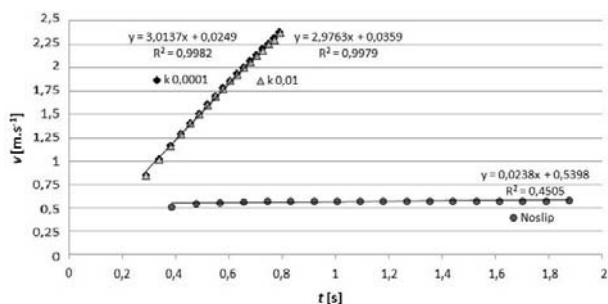
kapky na jejím tvaru. Čím větší je úhel smáčení a tedy čím menší je styčná plocha kontaktu kapky s pevným povrchem, tím rychleji kapka ujede danou dráhu.

Dále byl zkoumán tvar kapky s kontaktním úhlem 75° na nakloněné rovině dlouhé 1 m při zadání standardní stěnové funkce a poté dvouvrstvého modelu, který je vhodný pro modelování v blízkosti stěny. Obrázek 5 ukazuje kapky v čase 1 s, což je asi v 0,8 m dráhy. Tvary kapek vykazují postupující a ustupující úhel, projevila se tedy hystereze úhlu smáčení. U stěny je vhodné modelovat proudění s využitím dvouvrstvého modelu, protože tento model lépe popisuje tvar kapky. Rychlosti pohybu kapek se při těchto dvou výpočtech od sebe nelišily více než o 4 %.



Obrázek 5: Tvary kapek při výpočtu se standardní stěnovou funkcí (vlevo) a s dvouvrstvě modelem Enhanced Wall Treatment (vpravo)

Průběhy rychlostí pohybu kapek a průměrné hodnoty zrychlení kapek na smáčivém a částečně smáčivém povrchu jsou znázorněny v grafu na Obrázek 6. Kapky se pohybovaly na rovině dlouhé 1 m a nakloněné o 20° .



Obrázek 6: Porovnání rychlostí pohybu kapek na částečně smáčivém a smáčivém povrchu

Kapka na částečně smáčivém povrchu se pohybuje rychleji než kapka na klasickém smáčivém povrchu, protože fáze vody neulpívá na povrchu pevné fáze. Velký rozdíl je i v napětí na stěně. Pod kapkou na částečně smáčivém povrchu bylo napětí na stěně ke konci dráhy 5,611 Pa, na částečně smáčivém

povrchu se hodnota napětí pohybovala okolo $3 \cdot 10^{-4}$ Pa pro $k = 0,0001 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ a $2,3 \cdot 10^{-2}$ Pa pro $k = 0,01 \text{ Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$.

4. Závěr

Numerickými experimenty byly ověřovány předpoklady o částečné smáčivosti v potrubí kruhového průřezu a o pohybu kapky po nakloněné rovině. Částečná smáčivost na stěnách v potrubí má za následek změnu rychlostního profilu proudění, přičemž výsledky z numerických výpočtů vykazují dobrou shodu s teorií. Vliv částečné smáčivosti je zřejmý i u úlohy vyšetřování rychlosti pohybu kapky po nakloněné rovině. Kapka vody tekoucí po částečně smáčivé stěně ujede danou dráhu rychleji než kapka na stěně smáčivé. Téma hydrofobnosti bude dále prošetřováno fyzikálními i numerickými experimenty.

Výsledků v příspěvku bylo dosaženo při řešení specifického výzkumu (projekt SP2011/61 „Zkoumání fyzikálních vlastností materiálů a jejich vlivů na dynamiku proudění“ řešený v roce 2011) na Fakultě strojní VŠB-TU Ostrava.

5. Literatura

- [1] BARTOVSKÁ, L., ŠIŠKOVÁ, M. FYZIKÁLNÍ CHEMIE POVRCHŮ A KOLOIDNÍCH SOUSTAV, PRAHA, VŠCHT, 2010
- [2] POCHYLÝ, F., FIALOVÁ, S., KOZUBKOVÁ, M., ZAVADIL, L.: ASSESSMENT OF CAVITATION CREATION DEPENDING ON THE SURFACE WETTABILITY, ROMANIA, 25TH IAHR SYMPOSIUM ON HYDRAULIC MACHINERY AND SYSTEMS, 2010
- [3] POCHYLÝ, F., FIALOVÁ, S., RINKA, L.: ADHESIVE FORCES AT A SOLID-LIQUID INTERFACE, POLSKO, WYDAWNICTWO POLITECHNIKI ŚWIETOKRZYSKIEJ W KIELCACH, 2008
- [4] POCHYLÝ, F., FIALOVÁ, S., HABÁN, V., RINKA, L.: THE WETTABILITY OF THE LIQUID-SOLID INTERFACE, ČESKÁ REPUBLIKA, AS CR, 2008
- [5] FIALOVÁ, S., POCHYLÝ, F., RINKA, L.: THE ADHESIVE FORCE DETERMINATION ON THE INTERFACE OF PHASES, BRATISLAVA, STU, 2008
- [6] FIALOVÁ, S., POCHYLÝ, F., RINKA, L.: THE BOUNDARY CONDITIONS OF THE ADHESIVE FORCES EFFECT ON THE SOLID/LIQUID INTERFACE, PRAHA, AV ČR, 2009
- [7] ZAVADIL, L., DRÁBKOVÁ, S., KOZUBKOVÁ, M., FRODOVÁ, B.: THE INFLUENCE OF THE PARTIAL SURFACE WETTING ON THE FLOW FIELD IN TUBE WITH CIRCULAR SECTION, OSTRAVA, VŠB-TUO, 2011
- [8] FLUENT: FLUENT 12 – USER'S GUIDE. FLUENT INC., 2007