

Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.
Katedra mechaniky
Fakulta aplikovaných věd
Západočeská univerzita v Plzni
Technická 8
306 14 Plzeň

OPONENTSKÝ POSUDEK

disertační práce pana **Ing. Stanislava Pláničky**
nazvané

Matematické modelování dvoufázového proudění

Disertační práce Ing. S. Pláničky se zabývá aktuálním problémem modelování dvoufázového proudění s konkrétním aplikačním výstupem do problematiky olejových separátorů u šroubových kompresorů. Problematika modelování uvedeného proudění je velmi rozsáhlá, a je tedy zcela běžné, věnovat se modelování pouze vybraným typům proudění obecně disperzních soustav.

Cílem disertační práce je vytvoření takového matematického modelu dvoufázového proudění, který odpovídá potřebám průmyslové praxe a umožní konstrukčně zpřesnit dosud používané olejové separátory. Nedílnou součástí tohoto cíle je samozřejmě odpovídající rešerše obvykle používaných modelů proudění a analýza jejich vlastností.

Práce o 128 stránkách je rozdělena do 4 kapitol, kterým je předřazena motivace a úvod. V úvodu autor stručně vyjadřuje motivaci, stav řešené problematiky a cíle své disertační práce. Zařazuje svoji práci do řešené problematiky a uvádí stručný nástin obsahu práce. První kapitola je věnována rozsáhlé rešerši problematiky dvoufázového proudění, jsou uvedeny základní používané modely a je provedena přiměřená analýza jejich silných a slabých stránek. Součástí kapitoly je rovněž stručný pohled do historie modelů a základní klasifikace vícefázového proudění včetně numerických modelů. Základem je sice metoda konečných objemů, je však ale zmiňována celá plejáda numerických metod, např. nespojitá Galerkinova metoda konečných prvků, lattice Boltzmanovy metody, metody zachycení rozhraní, metody na bázi ALE popisu kontinua atd. Rozsáhlou kapitolu 2 lze charakterizovat jako teoretický základ předložené disertační práce. Je zde ukázáno na fyzikální základy a provedeno odvození obecného modelu dvoufázového proudění. Zdůrazněny jsou způsoby „uzavření“ matematických modelů a je poukázáno na různé typy stavových rovnic. V závěru kapitoly jsou potom poměrně podrobně uvedeny vybrané metody pro řešení rozvrstveného proudění, modely Eulerova typu a principy ALE modelů diskrétních částic. Jsou zde dále diskutovány proudové režimy, mezifázová silová působení, stavové rovnice stlačitelných tekutin (např. Taitova rovnice atd.). Zmíněny jsou i další metody řešení založené např. na tzv. značkovací funkci či vícerovnicové dvoutekutinové modely. Nakonec jsou potom uvedeny modely směsi včetně ALE modelů proudění disperzních soustav a jsou stručně uvedeny možnosti aplikace těchto modelů v technické praxi. Další kapitolu 3 disertační práce lze naopak charakterizovat jako testovací kapitolu, která je věnována validaci a verifikaci disertantem vyvinutých modelů dvoufázového proudění. Detailně jsou charakterizovány, odvozeny a popsány, modely dvoufázového proudění Eulerova typu, konkrétně čtyřrovnicový a šestirovnicový dvoutekutinový model a třírovnicový model pro

modelování proudění kapaliny s volnou hladinou. Disertantem vyvinutý numerický kód na bázi konečných objemů je zpracován v interpretu MATLAB. Řešeny byly testovací úlohy na problémech proudění kapalin, jejichž výsledky jsou z odborné literatury známé (např. Ransomův problém vodovodního kohoutku, Toumiův „shock tube“ problém, problém vzestupu bubliny atd.). Hned zde podotkněme, že disertantem dosažené numerické výsledky jsou s publikovanými výsledky plně srovnatelné. Kapitola 4 je nakonec věnována aplikaci dříve uvedených metod proudění tekutin při řešení problémů průmyslové praxe, konkrétně separaci oleje a vzduchu v olejových separátorech šroubových kompresorů. Při řešení těchto technických problémů byl použit výpočetní systém ANSYS Fluent při aplikaci dvoutekutinového modelu Eulerova typu. Analýzy byly provedeny pro tři různé geometrie separátorů a na základě dosažených výsledků byla stanovena obecná doporučení pro konstrukci separátorů. Je tedy jasně deklarováno využití výsledků disertační práce v praxi. V závěru své práce disertant shrnuje dosažené výsledky a vyzdvihuje konkrétní přínosy předložené disertační práce jak pro rozvoj oboru, tak i pro průmyslovou praxi. S těmito závěry je možno samozřejmě souhlasit.

Předložená disertační práce splňuje náročná kritéria jak po stránce teoretické a odborné, tak i po stránce grafické a stylistického zpracování. Práce je vyvážená, má logickou stavbu a je doplněna i experimentální smyčkou pro ověření přesnosti některých navržených matematických modelů proudění tekutin. Použité metody a přístupy k řešení daného problému lze hodnotit kladně, dosažené numerické výsledky jsou vyhodnoceny převážně ve formě grafů či tabulek. Zásadní závěry jsou doplněny vhodným komentářem. Jsem toho názoru, že disertant v práci prokázal svoje hluboké znalosti v oblasti teoretické mechaniky, mechaniky kontinua, aplikované matematiky, ale i v oblasti programování a modelování složitých problémů proudění disperzních soustav, resp. kontinuí různých fází. Ukázal, že je nejen teoreticky fundovaný, ale že je i schopen svoje teoretické úvahy dovést do konkrétních praktických výsledků. Tyto výsledky analyzuje a ukazuje jejich dopad na analýzu chování modelů proudění kapalin. Použití a zařazení experimentální smyčky se ukazuje jako vhodný nástroj validace a verifikace matematických modelů v oblasti proudění kontinuí různých fází. Použité metody a přístupy k řešení daného problému dokazují schopnost disertanta řešit na vysoké úrovni složité teoreticko-aplikační úlohy z různých oblastí mechaniky kontinua.

Disertační práce je napsána pečlivě, věcně, je srozumitelná a má logickou stavbu. Shrnuje na malém prostoru poměrně velké množství informací o modelování vícefázového proudění, které mohou být dále využívány např. pro pedagogické účely. Práce má vysokou odbornou úroveň a velmi pěknou grafickou úpravu s malým počtem přepisů. Celkový příznivý dojem z práce malinko ruší netradiční číslování obrázků v textu a ne vždy vhodné používání interpunkčních znamének (čárky). Některé formulace by možná také bylo možno více precizovat (pojmy typu numerická viskozita, odplouvající počáteční podmínka, úprava okrajových podmínek, krev ve velkých nádobách, možná velké množství zkratk apod.).

Nyní si dovoluji ještě položit disertantovi několik otázek jako úvod do diskuse při vlastní obhajobě disertační práce.

- 1) Jaký je fyzikální význam průměrovaných veličin (např. na str. 35 vztahy (2.42)).
- 2) Jaké požadavky musí být kladeny na přídavné členy, které jsou vkládány do rovnic proudění za účelem zlepšení stability numerického řešení?
- 3) Jak se definuje poloměr přechodové oblasti ε (str. 50)?
- 4) Jak se určuje fenomenologický parametr τ_2 dvoufázového proudění (str. 52)?
- 5) Jaký fyzikální význam má značkovácí funkce a je vztah (2.85) správný?

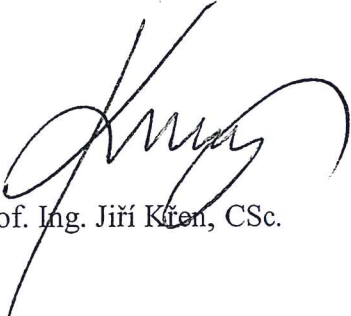
- 6) Jak byl určen průměr $d_2 = 1,01 \cdot 10^{-4}$ [m] (velikost částic oleje-sekundární fáze) na str. 108?
- 7) Jaký byl podíl disertanta na experimentální smyčce a jak si mám vysvětlit výrok, že dosažené numerické výsledky byly konfrontovány s kvalifikovaným odhadem pracovníků ATMOS?

Závěr

Doktorská disertační práce splnila všechny formulované a stanovené cíle. Práce má vysokou vědeckou úroveň s konkrétními teoretickými i praktickými přínosy. Je napsána pečlivě, má vysokou grafickou úpravu a je též východiskem pro další výzkum v oblasti modelování vícefázového proudění tekutin.

Z celkového hodnocení je zřejmé, že disertační práci doporučuji k obhajobě. Za předpokladu její úspěšné obhajoby doporučuji, aby panu Ing. Stanislavu Pláničkovi byl udělen akademicko-vědecký titul „doktor“ v oboru Aplikovaná mechanika.

V Plzni dne 21. října 2018



Prof. Ing. Jiří Křen, CSc.

Oponentský posudek disertační práce

Název práce: **Matematické modelování dvoufázového proudění**

Autor: **Ing. Stanislav Plánička**, Fakulta aplikovaných věd, Západočeská univerzita v Plzni

Školitel: Doc. Ing. Jan Vimmr, Ph.D.

Oponent: Ing. David Krivánka, ATMOS vývoj s.r.o.

1. Úvod

Předkládaná disertační práce si klade za cíl vysvětlit základní problematiku a podstatu dvoufázového proudění včetně fyzikálních vlastností směsí, které jsou potřebné pro modelování dvoufázového proudění, a to zejména s ohledem na potřeby průmyslové praxe. Práce s celkovým rozsahem 129 stran textu je členěna na tři samostatné celky:

- teoretická část obsahuje obsáhlou rešerši problematiky vícefázového proudění s definicí základních pojmů (první kapitola) a dále popis modelování dvoufázového proudění (druhá kapitola);
- druhá část popisuje autorovy implementace dvou dvoutekutinových modelů a řešiče s volnou hladinou (třetí kapitola);
- třetí část je věnována numerickému řešení problematiky olejových separátorů šroubových kompresorů (čtvrtá kapitola).

2. Význam práce

Teoretická část práce přináší přehledný popis používaných modelů pro řešení dvoufázového proudění. Je velmi dobře strukturována a obsahuje podrobnou diskusi použitelnosti jednotlivých modelů, a to včetně praktických příkladů. Zejména druhá kapitola je díky své přehlednosti jedinečným studijním materiálem.

Významný je rovněž autorův přínos v oblasti matematického modelování, zejm. v praktické implementaci třírovnicevého modelu.

Za zcela ojedinělou v dostupné odborné literatuře lze považovat čtvrtou kapitolu, tedy aplikaci nabytých poznatků na numerické modelování olejových separátorů šroubových kompresorů. Je rovněž třeba podotknout, že se nejednalo jen o matematické modelování fyzikální reality, ale že výsledky takto získané byly a jsou dále využívány při návrhu olejových separátorů.

3. Výsledky disertační práce

Práce obsahuje popis postupu, ale také bohatou diskusi jednotlivých výsledků. Z praktických příkladů je zjevné, že autor ověřoval své výstupy s odbornou literaturou i teoretickými předpoklady. Pokud nebylo dosaženo dobré shody výsledků s očekáváním (čtyřrovnicevý model při řešení „shock tube“ problému), jsou velmi dobře popsány důvody a omezení dané metody. V dalších příkladech jsou pak ukázány výpočty, kdy tato metoda dosahuje velmi dobré shody.

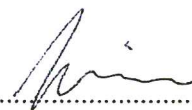
Při návrhu olejových separátorů je podrobně vysvětlena metodika i omezení plynoucí z dané průmyslové aplikace, a to včetně omezení při experimentálním získávání parametrů matematického modelu. Vzhledem k zaměření práce na dvoufázové proudění autor neuvažuje kondenzaci vodních par v olejovém systému šroubového kompresoru (vodní pára ovlivňuje chování stlačeného vzduchu, ale kondenzující voda má vliv i na parametry oleje). Toto zjednodušení je naprosto pochopitelné a vzhledem k dobré shodě výpočtu s experimentem zjevně nemělo znatelný vliv na výsledky, přesto by dle názoru oponenta mělo být alespoň okrajově diskutováno. I přes tento drobný nedostatek obsahuje čtvrtá kapitola problematiku dosud nepublikovanou, a je tedy z pohledu průmyslového využití unikátní.

3. Závěr

Předložená disertační práce je přehledná a dobře strukturovaná. Použitý styl s mnoha praktickými příklady přispívá ke snadnému pochopení problematiky a po formální stránce nelze mít proti práci žádných námitek. Rovněž práce se zdroji je příkladná a rozsah použité literatury odpovídá zvolenému tématu.

Oponent doporučuje disertační práci k obhajobě.

V Plzni 24. listopadu 2018


.....
Ing. David Krivánka

Oponentní posudek disertační práce

Název disertační práce: **Matematické modelování dvoufázového proudění**

Autor disertační práce: **Ing. Stanislav Plánička**

1. Úvod

Vícefázové proudění patří k nejobtížnějším problémům mechaniky kontinua. Jeho popis diferenciálními rovnicemi je založen na mnoha předpokladech, které je nutno formulovat v závislosti na řešené úloze. Například podmínky na rozhraní fází, nebo interakce částice s kapalinou, stlačitelnou, nebo nestlačitelnou.

Problematika je dnes velmi aktuální, zejména s rozvojem nanotechnologií, dopravy hydro směsí, pohybu kapalin s volnou hladinou, separací částic a v poslední době s řešením pohybu feromagnetických a magnetoreologických kapalin, obsahujících částice řádu nanometrů a mikrometrů.

2. Hodnocení

Velmi oceňuji zpracování literární rešerše. Autor zmínil nejen metody řešení vícefázového proudění, ale podrobil je důkladné a správné analýze. Na základě této analýzy a zkušeností jiných autorů, navrhl vlastní softwary pro různé třídy úloh na principu metody konečných objemů a úspěšně srovnal výsledky výpočtového modelování s experimentem. Na tomto místě je nutno ocenit velké množství kvalitní práce, která vedla ke správnému řešení. V této souvislosti je nutno vzpomenout například úpravu (na první pohled jednoduchou) advekční rovnice (3.97), která je velmi účinná a významně ovlivnila konvergenci řešení. Velmi cenné jsou závislosti, uvedené na obrázcích 19,20, pro posuzování dynamických vlastností systému se dvěma fázemi. U linearizovaného dvoufázového systému s obsahem vzduchových bublin, závisí vlastní frekvence na rychlosti zvuku a může dojít k rezonančnímu kmitání. Jak tomu bude u nelineárního dvoufázového systému?

Lze říci, že dílo je souborem vlastně dvou disertačních prací:

- důkladnou literární rešerši s vlastním odborným komentářem a
- formulací originálních matematických modelů různého stupně dvoufázového proudění, doprovázené vlastním softwarem a experimentem..

Jak formální, tak jazyková úprava disertační práce je velmi dobrá. Publikace autora disertační práce odpovídají její vysoké úrovni. Výsledků disertační práce bylo využito při řešení úloh technické praxe.

3. Závěr

Cíle disertační práce byly bezesbýtku splněny, disertační práce bude dobrým podkladem pro další studium vícefázového proudění.

Doporučuji disertační práci k obhajobě,



prof. Ing. František Pochylý, CSc.

V Brně dne 15.10.2018

