

Název práce:	Experimentální studie a numerické modelování proudění vlhkého vzduchu a kondenzace s využitím CFD simulací
Autor:	Bc. Jan Merunka
Typ práce:	diplomová
Vedoucí práce:	Ing. Petr Zelenský, Ph.D.

Zadání a náročnost tématu

Diplomant měl za úkol prostudovat literaturu se zaměřením na kondenzaci vodní páry obsažené ve vlhkém vzduchu, postavit a použít experimentální trať pro výzkum kondenzace vodní páry při obtékání chladného povrchu vlhkým vzduchem, sestavit vhodný model reprezentující experimentální úlohu, metodou CFD simulovat zkoumaný kondenzační proces a porovnat výsledky ze simulací a z měření.

Zadané téma považuji za náročné vzhledem k rozsahu práce v laboratoři a také z hlediska úrovně teoretického základu potřebného pro zvládnutí simulačních výpočtů.

Použité metody a získané výstupy

K použitým metodám mám připomínku, která se týká zvolené geometrie ochlazovaného povrchu. Příčné obtékání válce je samo o sobě případ poměrně komplikovaný kvůli nestabilitě mezní vrstvy. Proto takovou geometrii neshledávám úplně vhodnou pro testování modelů kondenzace vlhkosti, s nimiž ani autor, ani vedoucí práce neměli zpočátku žádné zkušenosti. Jinak lze konstatovat, že experimentální zařízení bylo sestaveno promyšleně a měření bylo provedeno systematicky a velmi pečlivě. Také zpracování numerického modelu a CFD simulací věnoval autor systematickou pozornost a velké úsilí. Výstupy práce proto považuji za spolehlivé, až na některé detaily, které jsou popsány dále v posudku.

Rozsah práce a její formální úroveň

Rozsah práce je 55 stran včetně seznamu použité literatury. Dále práce obsahuje 27 stran příloh – výpis UDF pro výpočet saturační teploty, technické podklady pro některé součásti experimentální trati, technické výkresy, kalibrační protokoly aj.

Práce je vhodně strukturována, zpracování textu bylo pečlivé, gramatické chyby (nejčastěji chybějící čárky v souvětích) se objevují ojediněle. Obrázky a grafické výstupy z měření i simulací jsou kvalitní a srozumitelné.

Textu by prospěla větší stručnost, zvláště v některých částech – např. problematika kondenzace vlhkosti ve stavbách je irelevantní pro tuto diplomovou práci, přesto jí byly věnovány cca 2 strany v úvodní části (s. 3–4), popis stavby experimentálního zařízení je zbytečně podrobný. Autor na začátku téměř každé kapitoly (někdy i podkapitol) popisuje, co daná část textu obsahuje. Není to potřebné vzhledem k rozsahu kapitol, obsah lze navíc dobře odhadnout z názvu každé kapitoly.

Autor někdy používá nevhodné termíny, zavádějící slovní spojení apod.:

- rosny bod je funkcí teploty, vlhkosti a tlaku (s. 2, vlhkost není veličina)
- fludizované lože (s. 5, používá se fluidní lože)
- částice s nízkým zatížením (s. 5)
- vlhký vzduch nekondenzuje (s. 7, v názvu kapitoly 2)
- přenos hmoty není veličina (s. 8, 9)
- difúzní koeficient (s. 10, správně součinitel difúze)
- kyblíková metoda (s. 24, slangový výraz)
- kontury (s. 43, slovo má v češtině význam obrysu)

Práce se zdroji informací a jejich citace

Seznam použité literatury obsahuje 19 položek. Práce jiných autorů je korektně odlišena od vlastní práce diplomanta. Mám pouze formální připomínku – zkratka *et al.* se používá, má-li citované dílo alespoň tři autory, v případě dvou autorů se uvádí obě jména (Šafařík a Vestfálová, 2016 – chybně citováno na s. 8).

Věcné připomínky

Popis experimentální části práce je doslova vyčerpávající, popis numerických modelů je téměř úplný a celkem korektní. Několik chyb se nachází v části práce věnované teoretickým základům modelování kondenzace.

V rovnici (2.2) na s. 9 je přirozený logaritmus parciálního tlaku vodní páry, zatímco v Příloze I (výpis UDF) je v daném vzorci zřejmě dekadický logaritmus.

K rovnici (2.3) by bylo vhodné uvést, že Moukalled et al. (2011) doporučují hodnotu koeficientu změny fáze $C_v = 0,2$. V té samé publikaci se ve vzorci (2.4) násobí měrné teplo vody (kapaliny) teplotou stěny, avšak autor DP zde použil teplotu v buňce (tj. nad stěnou). Používat absolutní teplotu pro výpočet entalpie ve vzorci (2.4) může být problematické při užití řešiče Fluentu pro nestlačitelné proudění, který běžně uvažuje referenční teplotu 273,15 K pro nulovou entalpii.

Není jasné, co vedlo diplomanta k sestavení vzorce (2.5), resp. proč nepoužil běžný vzorec např. z dokumentace, kterou poskytuje ANSYS Fluent. Raoultův zákon se týká parciálního tlaku složky v páře nad hladinou směsi kapalin – nemyslím, že je to případ, kterým se autor DP zabývá.

Rovnice (2.6) by byla rozměrově nekonzistentní, kdyby byl koeficient změny fáze C_f bezrozměrný. Jeho rozměr by měl být stejný jako rozměr řešené hustoty hmotnostního toku.

V popisu modelu *Eulerian Wall Film* (EWF) jsem nenašel nebo nepochopil některé detaily, např. co se děje s kondenzátem (odtéká dolů z povrchu válce?). K popisu tvorby kondenzátu jsou použity dvě veličiny – jedna ve formě hustoty hmotnostního toku (rovnice 2.6) a druhá označená jako rychlost změny fáze [kg/s]. Není jasné, zda a jak spolu tyto veličiny souvisí.

Nezávislost na hustotě numerické sítě by se měla posuzovat pro cílovou veličinu (pro model EWF např. tloušťka filmu kondenzátu nebo rychlost tvorby kondenzátu), takže přenášet poznatky o numerické síti z části potrubí před výměníkem (kde se řešilo pouze proudění) na část, kde dochází ke kondenzaci vlhkosti, není úplně správné. Bylo by také vhodné porovnat výsledky simulací s užitím alespoň dvou různých modelů turbulence, což pravděpodobně nebylo možné stihnout vzhledem k časové náročnosti nestacionárních výpočtů.

Komentář výsledků simulací a jejich diskuse

Podrobné analýze výsledků simulací a jejich porovnání s naměřenými daty jsou věnovány s. 43–51.

Uvedené závěry jsou většinou opodstatněné a lze s nimi souhlasit.

Na s. 43 a 46 je chybně uvedeno, že vzduch odevzdává latentní teplo do přeměny vodní páry na vodu. Při kondenzaci se naopak teplo uvolňuje (do chladné stěny a do vzduchu).

Domnívám se, že nápadně ostře ohraničená oblast se sníženou intenzitou kondenzace na spodní části trubek vzniká spíše jako důsledek mechanismu odvodu kondenzátu v použitém modelu EWF, než kvůli tepelnému odporu vrstvy kondenzátu.

Nesouhlasím s úvahou o parametru C_f (s. 50). Další zvyšování hodnoty tohoto parametru nebude mít podstatný vliv na výsledky. Největší relativní přírůstek hodnoty celého výrazu (2.6) způsobí změny C_f v řádu jednotek. Např. vzroste-li hodnota C_f z 5 na 10, změní se hodnota (2.6) asi o 10 %, stejný relativní přírůstek způsobí změna C_f z 10 na 100, avšak zvýšení C_f ze 100 na 10000 už způsobí pouze 1% nárůst hodnoty celého výrazu (2.6).

V tabulce 5.3 by byl vhodnější termín *odchylka* než *chyba*. Dále by bylo přehlednější, pokud by u odchylek bylo i znaménko naznačující, zde model podhodnocuje výsledky, nebo naopak.

Celkové hodnocení

Zadání diplomové práce bylo splněno. Diplomová práce podle mého názoru splňuje požadavky na úroveň absolventa magisterského studia na Fakultě strojní ČVUT v Praze. Diplomant prokázal schopnost řešit zadaný problém samostatně, zvládl úspěšně experimentální část práce, aplikoval pokročilé simulační metody. Zvláště oceňuji zájem diplomanta rozšiřovat své znalosti nad rámec absolvovaných studijních

předmětů a jeho odvahu pustit se do komplikované úlohy, na jejíž řešení neexistují rutinní postupy. I když se diplomant dopustil některých chyb, přínosy práce nad nimi zcela převažují. Proto navrhuji celkové hodnocení

A (výborně).

Žádám diplomanta, aby zodpověděl tyto dotazy:

1. Má být ve vzorci (2.2) dekadický, nebo přirozený logaritmus? Pokud došlo k chybě v kódu UDF, jaký to mohlo mít vliv na výsledky?
2. Z jakých důvodů a jakým postupem byl odvozen vzorec (2.5) pro výpočet hmotnostního zlomku vodní páry v nasyceném vlhkém vzduchu?
3. Vysvětlíte některé detaily modelu EWF. Co se děje s kondenzátem na chladném povrchu? Odkud se při výpočtu získá tzv. rychlost změny fáze [kg/s] a jak souvisí s veličinou vypočtenou podle rovnice (2.6) [kg/m²s]? V popisu modelu EWF je zmíněna nutnost omezit maximální tloušťku filmu kondenzátu na polovinu tloušťky buňky u stěny. Avšak při simulaci tvorby kondenzátu není jeho tloušťka předem známá. Prosím o komentář k tomuto rozporu.

V Praze 20. června 2023

.....
Ing. Martin Barták, Ph.D.