



Oponentský posudek PhD disertační práce

"Přestup tepla mezi plynem a kapalinou ve dvoufázových kontaktorech"
Martin Žižka, ÚPZT, FS, ČVUT Praha

Obecná charakteristika

Disertace se zabývá náročnou a složitou problematikou transportních procesů ve vícefázových soustavách. Specificky se jedná o mezifázový přenos hmoty a tepla ve dvoufázové soustavě kapalina-plyn. Konkrétní implementací této tokové situace je zde probublávaná kolona, coby typický představitel těchto aparátů, často používaný v praxi v široké škále provozních postupů a výrobních technologií.

Práce obsahuje masivní literární rešerši na daná témata, nutnou k řádnému uchopení zvoleného problému v celé jeho šíři: vícefázová hydrodynamika, přenos hmoty, přenos tepla. Tato teoretická část je velice cenná a zahrnuje četné literární zdroje, různé -často odlišné- pohledy různých autorů na danou věc, základní matematické vztahy, vliv relevantních parametrů na průběh procesu, rozsáhlé sady korelačních formulí pro praktický výpočet klíčových veličin, a také osobní postřehy a názory studenta, což není zcela běžné. Také jsou zahrnuty postupy měření a způsoby vyhodnocování experimentálních dat. Sepsání takové rešerše je již samo tvůrčím aktem prokazujícím schopnosti pisatele.

Vlastní práce studenta je jasně vymezena a skládá se ze dvou položek: i) teoretické úvahy potřebné pro návrh měření, plán experimentů a vyhodnocování dat, ii) experimentální práce na laboratorních modelech bublaných kolon. V té první jsou probrány různé přenosové mechanismy a posouzení jejich důležitosti v dané situaci, uvedeny vztahy pro určení velikosti mezifázového povrchu, vztahy pro výpočet transportních parametrů - součinitel přestupu: kapalina - plyn. V té druhé je popsána měřicí aparatura, uveden postup měření, sběr dat a jejich zpracování a vyhodnocení výsledných veličin, uvedeny přehledy experimentálních výsledků (rozložení velikostí bublin, mezifázová plocha, součinitel přestupu, vztah mezi sdílením tepla a hmoty). Je také učiněno ověření experimentálních předpokladů(!). Dále je provedeno porovnání získaných výsledků měření s vlastní teoretickou předpovědí a s výsledky jiných autorů.

Struktura práce

Dizertace má klasickou strukturu monografického textu vytvořeného autorem za supervize a zpětné vazby školitelů (nejedná se tedy o komentovaný soubor publikovaných prací). Je členěna do 20 hlavních kapitol.

Kapitoly 2-7 (str. 11-102) tvoří obsáhlou kritickou literární rešerši.

Kapitola 8 (str. 103) vymezuje cíle práce.

Kapitola 9 (str. 104-107) prezentuje základní koncepční rámec pro popis úlohy.

Kapitoly 10-14 představují vlastní práci studenta.

Kapitoly následující obsahují poděkování, nomenklaturu, literární odkazy, seznam grafiky, soupis použitých měřících přístrojů a jejich základních parametrů - to je velmi chvályhodné (nebývá to dnes samozřejmostí).

Kapitola 20 (str. 209-327) je souborem příloh, kde jsou uvedena základní změřená a spočtená data.

Dizertace operuje se třemi různými základními tématy: hydrodynamika, přenos hmoty, přenos tepla, která jsou poměrně vhodně poskládána je jednotného celku, což není triviální záležitost.

Hodnocení práce

Disertační práce se úspěšně zabývá vysoce náročným tématem, pro které patrně studenti nedostávají patřičný výukový základ (nevím zdali se jim přednáší předmět Vícefázová Hydrodynamika). Tedy student musel vyvinout značné intelektuální úsilí, aby do tohoto oboru nejen pronikl, ale byl v něm schopen také tvůrčím způsobem pracovat. Práce budí respekt jak po stránce kvantitativní, tak i kvalitativní. Rozsah textu je značný, zpracované kvantum zdrojů obdivuhodné. Student prokázal schopnost pracovat s trojnásobným tématem, analyzovat ho a vytvořit slušnou syntézu. Ukázal, jak málo se ve skutečnosti ví o sdílení tepla v situaci bublina-kapalina, jak moc je odpor soustředěn na straně plynu (isolant) - na rozdíl od sdílení hmoty, upozornil na roli, jakou může hrát vnitřní cirkulace plynu. Vypracovanou rešerši i vlastní získané výsledky lze považovat za velice hodnotné, jak pro současný okamžik a jejich praktické použití v konkrétních aplikacích, tak jako solidní znalostní základ pro rozvíjení tohoto tématu a odrazový můstek pro další studenty. Práce je sepsána pečlivě a obsahuje řadu vhodných grafických vstupů. K práci nemám žádných zásadních připomínek. Práce jasně prokazuje vědeckou kvalifikaci autora, který je dle mého názoru hoděn titulu PhD.

Vyjádření k požadovaným bodům

Dosažení stanovených cílů

Stanovené cíle byly dosaženy.

Úroveň rozboru současného stavu problematiky

Současný stav problematiky byl analyzován až za hranice běžné disertace.

Teoretický přínos

Teoretický přínos práce je významný.

Praktický přínos

Praktický přínos práce je významný.

Vhodnost použitých metod řešení

Použité metody jsou adekvátní zadání řešené úlohy.

Způsob jakým byly zvolené metody použity

Zvolené metody byly použity náležitě.

Prokázal student potřebné znalosti v daném oboru

Ano, prokázal.

Formální úroveň práce

Velmi dobrá.

Závěr: disertační práci plně doporučuji k obhajobě.

Marek Růžička, ÚCHP AVČR Praha

Praha, 20. května 2021

Příloha k posudku

Zde je několik dotazů oponenta. Očekává se, že student na ně zareaguje a v elektronické formě (dotaz + odpověď) je před komisí promítne. V případě potřeby je možno konzultovat s oponentem (ruzicka@icpf.cas.cz). Je zde také několik drobných poznámek sloužících pouze pro vnitřní studentovu reflexi.

I. Dotazy oponenta

Strana: 18

Autor: "...V závislosti na velikosti otvoru k maximálnímu průměru otvoru v distributoru plynu..."

Dotaz: Jaký je fyzikální smysl veličiny 'maximální průměr otvoru v distributoru' $d_{h,max}$?

26

"... Sideman [62] definoval specifický mezifázový povrch jako poměr mezi mimovrstvovou rychlostí a mezní stoupavou rychlostí bubliny ..."

To je zvláštní. Ukažte fyzikální smysl této definice.

44

"... Mikrovlnné měření. Tato metoda je vhodná ..."

Objasněte princip této metody.

78

Co soudíte o člověku, který v empirické korelaci používá exponent o hodnotě 127.8?

Spočítejte, kolik je e^{+128} a e^{-128} . Setkáváme se v inženýrské praxi často s prvním z těchto čísel?

79

"... velikost bubliny nemá žádný vliv na celkový přestup tepla ..."

Diskutujte vliv přítomnosti plynné fáze na proces sdílení tepla mezi vsádkou a stěnou.

Struktura kapitol

Z hlediska logiky výkladu látky bych považoval za vhodné následovat tuto posloupnost: hydrodynamika (kap.3) → sdílení hmoty (kap.4) → sdílení tepla (kap.5). Důvod: proudění je základ, na který jsou superponované oba transportní procesy, a to navíc v případě, že je zde velmi slabá zpětná vazba, kterou by transport ovlivňoval proudění. Sdílení hmoty je lehčí a lépe prostudované. Sdílení tepla je těžší a zhusta využívá analogií s hmotou a její poznatky (např. mezifázový povrch). Tudíž:

Kap. 3 hydro - je na svém místě.

Kap. 4 hmota - místo toho je teplo. Kap. 4.1 je ale věnována základním teoretickým konceptům, které byly vyvinuty pro hmotu (tak nás to alespoň ve škole učili). Následně se používají také pro teplo.

Kap. 5 teplo - místo toho je hmota.

Jaký je důvod pro použití této sekvence témat?

Lze nabýt dojem, jako by se student cítil provinile, že tam zařadil i tu hmotu, a snažil se to nějak neuměle skrýt či zamaskovat (jakoby směs cudnosti a strachu). Ale to je zbytečné. Hrdě se přihlaste ke svému dílu: důkladný rozbor sdílení hmoty je ve vaší práci zcela namístě, to obhájíte před všemi (soudnými) lidmi.

Sdílení hmoty a tepla: podobnosti x rozdíly

Většinou se hledají, a tudíž i nalézají, hlavně podobnosti mezi oběma procesy (jak by to šlo).

Žádám studenta, aby naopak sestavil seznam rozdílů a ukázal, které lze překonat a jak, a které jsou obtížné, až nezvládnutelné (proč to nejde a jít nemůže). Hint: jaká fyzikální substance se sdílí? jakou afinitu má k různým fázím? jak mění jejich vlastnosti (two-way coupling: hydro ↔ transport).

II. Drobné poznámky

20

"... při homogenním režimu velikost a rovnoměrnost bublin závisí „na vlastnostech kapaliny, distributoru plynu a průměru kolony“ a při heterogenním režimu „závisí na distributoru plynu, průměru kolony a fyzikálních vlastnostech kapaliny“. ..."

Jaký je mezi tím rozdíl?

25

"... povrch bubliny vztažený k objemu celé kapaliny ..."

Nebo spíše: povrch všech bublin vztažený k objemu plyno-kapalinové směsi?

27

"... na základě neizokinetického přerušení přívodu..."

Objasněte fyzikální podstatu jevu 'neizokinetické přerušení'.

28

"... režim tzv. plouživých bublin (anglicky slug flow) ..."

Kde jste přišel na termín 'plouživá bublina'? Máme český ekvivalent pro "plug/slug bubble"?

Proč píšete 'Churn' s velkým 'Ch'?

Obr. 3-6. Vysvětlete fyzikální rozdíl mezi 'dokonalou' a 'nedokonalou' bublinou.

32

"Churnův turbulentní", viz 28.

"... koncept proudícího toku ..."

Diskutujte rozdíl mezi proudícím a neproudícím tokem.

37

Rov. (342). Odkud máte ten strašný vzoreček? Jak byste ho v praxi použil?

67

"... Pro vysvětlení přenosu hmoty, a tepla, jsou nejpoužívanější čtyři teorie, filmová a dvou-filmová (stagnant-film), penetrační (Higbie's penetration theory), teorie obnovy povrchu (surface renewal theory) a teorie mezní vrstvy (boundary layer theory). ..."

Zde zmíněná teorie mezní vrstvy není v textu práce uvedena. Naopak, je tam uvedena teorie Kolmogorovova, která není zmíněna zde.

69

"... Předpoklady této teorie jsou: 1) přenos z plynu do kapalného prvku nastává při kontaktu za nepravidelného stavu, 2) mezi plynem a kapalinou existuje rovnováha, ..."

Definujte pojem 'nepravidelný stav'.

Jak mohou probíhat transportní děje, když je mezi plynem a kapalinou rovnováha? Co je jejich hnací silou?

102

"... Přestupem tepla mezi plynnou disperzí a stěnou kolony nebo vestavbami se více autorů (více než 20). ..."

Patrně zde chybí sloveso.

112

Obr. 111. Za jakých podmínek by 'Plyn' tvořící obsah bubliny na obrázku mohl 'kondenzovat'?

120

$u_T = u_{r,\infty}$, index "T" se vztahuje k turbulenci, asi má být "t".

"...režim sféricky šálkových bublin..."

Kde jste přišel na termín 'sféricky šálková bublina'? Máme český ekvivalent pro 'spherical cap bubble'? (kulová úseč, vrchlík, sférická čapka)

128

"...Dle mých zkušeností při experimentech je nutné distributor plynu volit především z důvodu dostatečného nebo naopak nedostatečného probublávání, kdy distributor plynu již nezvládá průtok plynu nebo naopak část distributoru plynu zůstane neprobublávána. O tomto problému se žádný z autorů z provedené rešerše nezmiňuje...."

Malý průtok (kdy patro začne celé bublat). To se studovalo, podívejte se na WOS na klíčové výrazy: "weeping" a "stable plate operation regime", ev. v kombinaci s "bubble formation". Věřím, že nějaké odkazy najdete (průtok plynu jedním otvorem distributoru - perforovaného patra, kritická hodnota, orifice Weber number, apod.).

Velký průtok (kdy už patro nestíhá). To se možná moc nestudovalo, protože tato situace není provozně moc zajímavá, resp. nechceme se do ní dostat. Jedná se o úlohu zjistit průtok Q skrze otvor patra při zadaném rozdílu tlaků Δp (kolik tudy procpete). Pro tenké patro je to něco jako výtok tekutiny otvorem ve stěně. Pro tlusté patro a tenký otvor je to něco jako tok trubkou konečné délky. Zkuste si pro to najít nějaké šikovné vzorečky a ověřit si je v laborce.

129

"...respektive protože průřez kolou se nemění..."

To být špatný čeština.

133

Tab. 125. Měřil jste někdy povrchové napětí? Za kolik platných míst by jste dal ruku do ohně?

"...Pro vysoké hodnoty zádrže plynu, kde $\varepsilon_g \rightarrow 1$ předpokládáme, že [v koloně] proudí pouze plyn...." Jedná se tedy o tok plynu trubkou a relevantní $Re = (\text{rychlost plynu}) \cdot (\text{průměr trubky}) / (\text{viskozita plynu})$ a nikoli jak ukazují vaše rovnice níže.

Vztah 1241 je Re pro jednu izolovanou bublinu v nehybné kapalině, a pro danou bublinu v daném médiu je to konstanta. Obv. se ale volí za charakteristickou rychlost ta terminální, u_t .

Vztah 1242 je Re pro typickou bublinu v bublané vrstvě, tedy pro kolektivní pohyb velkého souboru bublin, jejichž společný vzestup produkuje zpětný tok kapaliny, což způsobuje zpomalující efekt (hindrance, Richardson-Zaki). Průměrná vzestupná rychlost jedné bubliny u_b v homogenním mraku o zádrži e je obecně nižší než její terminální hodnota u_t , tedy $u_b = u_t \cdot (1-e)^n$, což je uzávěrová rovnice (closure relation) pro dosazení za $u_b(e)$ do základních bilančních vztahů pro e .

Hodnota u_b vystupuje ve vztahu pro zádrž, $e = u_g/u_b(e)$, což je bilance hmoty plynné fáze v koloně v ustáleném stavu. Toho aproximací je vaše rovnice 1111, kde se předpokládá $u_b \approx u_t = \text{konst.}$, čímž ignorujeme kolektivní efekt a dostáváme lineární vztah: $e = u_g/u_t = \text{konst.} \cdot u_g$. Ten také ukazuje rovnice 1245, $e = 2 \cdot u_g$, tudíž $u_t = 0.5 \text{ m/s}$, což je na vaše bubliny až moc rychlé. Měřil jste u_t ? Díky fixnímu poměru $u_g/e = 0.5$ dostaneme vždy stejnou hodnotu Re v tab. 126.

216

Obr. 2017 a další. S jakou přesností bylo stanoveno odpařené teplo? Kolik platných míst je rozumných v korelaci v tom grafu: např. úsek 271.55 ?

Nomenklatura

c koncentrace [mol/m^2] - asi chybná jednotka

q hustota tepelného toku [J/m] - asi chybná jednotka

R, Q', S - není abecedně

u mimovrstvová rychlost - není vhodné používat pro vzestupnou rychlost jednotlivých bublin $u_{r,t,T}$