



Akademie věd České republiky

Teze disertace  
k získání vědeckého titulu "doktor věd"  
ve skupině věd chemických

**Režimy toku ve vícefázových  
plyno-kapalinových soustavách**

.....  
název disertace

Komise pro obhajoby doktorských disertací v oboru: Chemické inženýrství

Jméno uchazeče: Marek Růžička

Pracoviště uchazeče: Ústav chemických procesů AV ČR, Praha

Místo a datum: Praha, září 2011

# **"Flow regimes in gas-liquid multiphase systems"**

## **Resume**

This Resume presents briefly the content of the DSc. dissertation thesis, which has a form of the commentary of the research results published in a series of scientific articles of the applicant. The thesis comprises 17 papers (denoted as P1 - P17) published in 5 different journals, reputable in our sector. The structure of the thesis reflects the fact that our research has been performed on three different levels of resolution of the gas-liquid multiphase systems under study, namely on three length-scales, denoted as: micro, meso, macro. Respecting the triple length-scale hierarchy is a particular feature of our approach.

The microscale level corresponds to investigation of the elementary phenomena underlying the collective behaviour of the bulk macroscopic dispersions confined in containers, e.g. single bubble formation at submerged orifices, dynamics of bubble formation at perforated plates, single, double and multiple regimes of simultaneous bubble production at gas distributors. The focus goes on the dynamical modes of the formation dynamics and the mutual interactions between the bubble producing sites, aimed at the eventual finding where the various degree of basically unwanted nonuniformity encountered at working with plates originates from.

The macroscale level concerns the bulk gas-liquid macroscopic dispersions (bubble beds, bubbly layers) as known from operating the plethora multiphase equipment for the phase contacting and reacting purposes, in the variety of branches of industrial applications (chemical, petrochemical, pharmaceutical, metallurgy, biotechnology, ecology, etc.). The gross behaviour of bubble columns, the typical representatives of these processing vessel, is explored, as for the main features of the gas-holdup, flow regimes, their stability and transitions, and other aspects of the multiphase hydrodynamics of the bubble columns.

The mesoscale level is fitted in between the two above specified, to enable us to facilitate the step from understanding the micro to comprehending the macro, to bridge the extensive knowledge gap between these two far separated extremes via one or more helpful intermediate steps. These hypothetical conceptual steps are materialized through the detailed studying of the internal dynamics of clusters of a finite number of dispersed particles (e.g. bubbles) that are undergoing kinds of intense hydrodynamic interactions, developing thus a whole spectrum of regimes and collective modes.

The dissertation covers over 15 years of intense research into the subject and brings new and valuable results regarding the flow regimes in gas-liquid multiphase systems, obtained by applying more physically minded approach to this complex system, more than had previously been applied within the scope of the classical chemical engineering. Symptomatically, the key question we have been asking is "why" rather than "how". Also, besides the new physically oriented multiphase world-view, our rejuvenated Department was provided with a firm experimenting base and powerful CFD capability.

## **Obsah tezí**

1. Úvod: východiska a motivace	4
2. Základní myšlenky, metody a výsledky dizertace	7
2.1 Výzkum na hierarchické úrovni MIKRO	7
2.2 Výzkum na hierarchické úrovni MEZO	11
2.3 Výzkum na hierarchické úrovni MAKRO	13
3. Závěry dizertace	17
4. Publikace tvořících podklad dizertace	18
5. Celková publikační činnost uchazeče	21
6. Seznam použité literatury	26

## **1. Úvod: východiska a motivace**

Tato práce vznikla jako produkt jistých historických okolností (Almanach 1960-2010), kdy dozněla jedna etapa výzkumu vícefázové hydrodynamiky plynokapalinových soustav na našem ústavu, která byla započata našimi předchůdci začátkem 70-let a bylo možné na předešlý vývoj navázat etapou další počátkem 90-let, která se od té předešlé kvalitativně lišila v množství dostupných informací, možnostech instrumentálních, jakož i mohutností kontextu dostupné mezinárodní spolupráce a komunikace. V této následující etapě se na výzkumu podílel i uchazeč a jeho příspěvek je shrnut do této dizertační práce.

Moderní chemické inženýrství u nás v padesátých letech, krátce po druhé světové válce, založil americký vědec George Standard, který vychoval řadu významných vědeckých osobností a ty založily výzkumné týmy v různých oblastech chemického inženýrství. Přímým žákem Standarda byl také František Kaštánek.

Kaštánek se dlouhodobě a intenzivně zabýval studiem chováním plynokapalinových soustav. Započal s problémem destilace (kapalina-pára-plyn) a poté přešel k probublávaným systémům (kapalina-plyn), jako jsou probublávané kolony, airlifty, apod. Tato zařízení jsou konkrétními typy aparátů, které slouží ke kontaktování plynné a kapalné fáze za účelem umožnění sdílení hmoty, hybnosti a energie, s eventuelní přítomností dějů reakčních (chemické, enzymatické, biologické). Probublávaná nádoba či nádrž a airlift jsou dva typičtí reprezentanti kontaktačních a reakčních systémů (contactors, reactors), které se používají v praktických aplikacích ve mnoha průmyslových odvětvích (průmysl chemický, petrochemický, metalurgický, potravinářský, farmaceutický, biotechnologie, čistírenství, atd.). Ve skupině Kaštánka byly studovány rozličné aspekty chování proplyňovaných soustav z chemicko-inženýrského hlediska, jako např. přestup hmoty za přítomnosti chemické reakce různého typu, tok plynokapalinové směsi v zařízení daného typu, charakteristiky různých typů plynokapalinových kontaktorů a reaktorů, vývoj korelačních vztahů pro návrhové účely směrem k reálným průmyslovým zařízením a pro zvětšování měřítka (scale-up), návrh kritérií pro výběr nejvhodnějšího aparátu pro daný problém a danou konkrétní aplikaci. Více než dvě desetiletí usilovné práce pak byly završeny sepsáním obsáhlé monografie (Kaštánek a kol. 1988, 1993). Tradice pak přešla na jeho mladšího kolegu a žáka, Jindřicha Zahradníka.

Zahradník pokračoval v započatém díle a začal se podrobněji věnovat jistým dílčím aspektům proplyňovaných soustav, které považoval za důležité pro posunutí hranice poznání v této oblasti směrem k novým znalostem, které by umožnili efektivnější návrh těchto důležitých aparátů. Mezi jeho prioritní témata patřily např. tyto problémy: optimalizace distributoru plynu (typ, tvar, geometrie) na chování a výkon reaktoru, návrhy řešení i pro velmi speciální účely (např. bioreaktory pro kultivace kořenových kultur /hairy-roots/ či tkáňové kultivace /tissue cultures/), fyzikálně-chemické vlastnosti fází na chování a výkon

dvoufázového zařízení (vliv přítomnosti elektrolytů, surfaktantů, viskozitu měnících látek, apod.), vliv míry koalescence na chování soustavy (systémy se silnou či potlačenou koalescencí), apod. Zahradník sepsal řadu kvalitních článků, které se staly citační klasikou v daném oboru a vešel do povědomí mezinárodní vědecké obce v našem tematickém sektoru. Jeho dlouhodobou spolupracovnicí a pomocnicí byla M. Fialová.

Tato etapa je završena poslední Zahradníkovou prací o dualitě režimů v probublávaných kolonových reaktorech (Zahradník 1997), která má charakter stručného přehledného článku, byť jím formálně není. V tu dobu již byl Zahradník těžce nemocen, poté hospitalizován a následně předčasně umírá v r. 1999.

Jednou důležitou věcí, kterou Kaštánek se Zahradníkem během své rozsáhlé experimentální činnosti odhalili, je skutečnost, že za určitých podmínek se probublávaný systém může nacházet ve dvou kvalitativně různých tokových režimech, homogenním (HoR) a heterogenním (HeR). Tyto režimy jsou velice rozdílné z hlediska chování a výkonu celého aparátu a je proto nejvýše žádoucí zjistit, za jakých podmínek bude který z nich převládat. Výzkum režimů se proto stal prioritou a byla vykonána řada důležitých měření, která tuto problematiku částečně zmapovala.

Jiří Drahoš vstoupil do uchazečovy životní a profesní dráhy asi kolem roku 1993, kdy proběhla restrukturalizace celého našeho ústavu, jako vedoucí nově ustaveného oddělení Vícefázových reaktorů, které v sobě sloučilo 3 různé subjekty: původní Kaštánkovu Skupinu reaktorů plyn-kapalina, skupinu reologie, a část skupiny systémového inženýrství, v níž Drahoš původně pracoval. Začal zavádět do vícefázového výzkumu prvky nelineární dynamiky, s celou svojí následnou filosofií analýzy signálů z vícefázových reaktorů, která používala zcela nové přístupy a koncepty inspirované teorií chaosu a fraktální geometrií (dimenze atraktoru, korelační dimenze, Kolmogorovská entropie, apod.). Tyto postupy aplikoval jak na velkém měřítku (signály z celých kolon, identifikace režimů) tak na měřítku malém (elementární vícefázové události - např. tvorba bublin, apod). Tím se původní záběr výzkumu, který se předtím týkal spíše -byť ne zcela-makroskopických problémů (chování kolony jako celku) rozšířil i na 'mikroskopickou' úroveň danou chováním jednotlivých prvků tvořících dispergovanou soustavu (např. bubliny, kapky, tuhé částice). Vznikla tedy jakási dichotomie, kdy jsme současně vedle sebe studovali jevy a děje na mikro a makro měřítku

Uchazeč plynule přešel z Kaštánkovy skupiny do Drahošova oddělení a zapojil se do práce na tematech spadajících do obou linií. Základní jeho ambicí bylo nikoli pouze popsat chování složitých systémů, ale snažit je i pochopit jeho příčiny, tedy posun od otázky "JAK" k otázce "PROČ". Šťastnou shodou okolností mohl uchazeč absolvovat roční (1994-1995) zahraniční stáž v Anglii, na University of Birmingham, ve výzkumném týmu, který N.H. Thomas. Tento člověk byl vynikajícím vědcem, původem teoretický fyzik, se specializací na dynamiku tekutin, který se celý život věnoval hydrodynamickým problémům všemožného typu, jak jednofázovým tak vícefázovým, inspirovaným těmi nejrůznorodějšími motivacemi. Byl dobře známý v mezinárodní vícefázové

komunitě a svými pracemi významě přispěl k rozvoji tohoto oboru. NHT měl přesně ten odborný profil a erudici, kterou uchazeč potřeboval získat: fyzikální přístup k vícefázové hydrodynamice, kladení otázek po příčinách jevů, zacílení na ty základní mechanizmy stojící za daným jevem, jejich odhalení a možno-li ještě jejich matematická formulace ve tvaru formálního modelu procesu v termínech jasných a dobře definovaných fyzikálních veličin. Po návratu ze stáže vytvořil Drahoš uchazeči široký pracovní prostor, který tento začal vyplňovat mnoha nápady a ambicemi, jimiž byl zcela nabit. Původní tématická dichotomie zůstala zachována, a souběžně byly studovány vícefázové problémy jak na malém měřítku (MIKRO - tvorba a chování jednotlivých bublin, vliv parametrů, apod.) tak na měřítku velkém (MAKRO - chování proplyňované vrstvy jako celku, jeho základní vlastnosti a režimy toku). Toto schizma se ukázalo jako velmi užitečné a plodné. Obvykle se totiž badatelé zabývají pouze jedním anebo druhým přístupem (odborníci na chování jednotlivých dispergovaných částic zpravidla nejsou odborníky na vícefázové kontakty a reaktory, a naopak). Právě souběžnost obou témat přiměla uchazeče se hlouběji zabývat jejich vzájemným vztahem, o němž se vědělo, že -pakliže nějaký vůbec je- tak je extrémně komplikovaný a téměř neuchopitelný. Byla to tedy dosud neřešená problematika středního měřítka, tj. hydrodynamika mezoskeju (MEZO - oblast studia mezi mikro a makro). Časem se náš výzkum vyprofiloval do tří souběžných linií, které představují tři komplementární pohledy na vícefázový systém. Tento přístup je nazývá "škálový", poněvadž zkoumá vzájemně provázané jevy, které dohromady tvoří obtížně uchopitelný celek, odděleně na různých úrovních rozlišení (multiscale approach).

MIKRO. Zabývali jsme se zejména problematikou tvorby bublin na ponořených otvorech, obv. perforovaných patrech, protože tento výzkum byl motivován praktickými aplikacemi, jak bývá v technické chemii a chemickém inženýrství dobrým zvykem. Studovali jsme různé režimy tvorby bublin, počínaje jedním jediným otvorem a úlohu jsme postupně rozšiřovali na větší počet otvorů, kde přibýval problém jejich vzájemné interakce, a to jak v plynné fázi v komoře umístěné pod patrem, tak v kapalně fázi nad patrem kde se vytváří plynokapalinová směs. Cílem bylo prozkoumat různé režimy tvorby bublin, sledovat jejich pravidelnosti či nepravidelnosti, neboť z toho lze usuzovat na výsledné chování celé vrstvy a tedy i na charakter režimu převládajícího v celé koloně (HoR či HeR).

MAKRO. Současně s tím jsme také zkoumali chování kolony jako celku, zejména oblasti existence dvou základních režimů (HoR a HeR), charakter jejich vzájemného přechodu, okolnosti za nichž homogenní režim ztrácí svoji stabilitu a vyvíjeli jsme metody spolehlivého určení kritického bodu - prahu nestability HoR, z experimentálních dat. Byly získány zajímavé výsledky, které jsou v mezinárodní komunitě poměrně slušně ceněny: vliv operačních parametrů na stabilitu homogenního režimu (rozměry kolony, viskozita vsádky, přítomnost tuhé fáze ve vsádce - např. částice katalyzátoru, přítomnost povrchově aktivních látek - surfaktantů, zejm. elektrolytů). Kromě těchto experimentálních poznatků jsme vypracovali dva fyzikálně dobře podložené koncepty pro výklad nestability HoR.

MEZO Postupem času nazrála doba, kdy bylo vhodné se pokusit nějakým způsobem propojit mikro a makro úroveň, tj. dva naše dosavadní základní přístupy k vícefázové problematice, tedy vytvořit jakýsi most mezi poznatky o jedné dispergované částici a jejich velkým souborem (mezoskejl - pracovně definovaná oblast takového rozsahu systému, který leží mezi jednotlivými částicemi a jejich hodně velkým souborem). Cesta od znalostí o jedné dispergované částici (mikro) ke znalostem o velkém jejich souboru (makro) není snadná, ani konceptuálně, ani technicky. Naše volba byla studium klastrů (shluků, omezených souborů) bublin se vzájemnými hydrodynamickými interakcemi.

Dizertace představuje ucelený výběr základních prací, které přispěly k rozvoji vícefázové problematiky a podržuje si toto trojjediné členění, aby byl zdůrazněn náš škálový přístup.

## **2. Základní myšlenky, metody a výsledky dizertace**

Dizertace má formu komentáře k publikovaným časopiseckým pracím, kterých je celkem 17 a jsou označeny jako P1-P17. K úrovni mikro se vztahuje 7 prací, k úrovni mezo práce 2 a k úrovni makro prací 8.

### **2.1 Výzkum na hierarchické úrovni MIKRO**

Tvorba bublin plynu v kapalinách je naprosto základním a stěžejním jevem v úvahách o proplyňovaných soustavách. Je více způsobů, jak vytvořit plynokapalinovou směs, např. vtlačit plyn do kapaliny (perforovaná patra), přisát plyn do poudu kapaliny (ejektory), vmíchat plyn do kapaliny (míchadla), využít zdroj plynu na hranici kapaliny (elektrolýza) či v jádře kapaliny (destaurace, kavitace), apod. V našem případě se zabýváme hlavně první z těchto možností, díky původní motivaci dané studiem probublávaných kolon, kde je tento případ typický. Problematika jednotlivých bublin se skládá z řady dílčích dějů.

Vlastní tvorba bubliny na ponořeném otvoru zahrnuje dynamiku tvorby, rychlost růstu, výsledný objem a tvar, kritérium pro odtržení, apod. Důležitý z hlediska výsledku je zde také režim bublání, kterých je vícero a liší se počtem a velikostí bublin, frekvencí jejich tvorby a zejm. pravidelností jejich produkce. Režim bublání do značné míry určuje režim chodu celé kolony. Klíčovou roli zde hrají vzájemné interakce mezi otvory na patře, kde mohou vznikat složité aperiodické režimy.

Dalším dějem je vzestup bubliny kapalinou (či průchod plynokapalinovou směsí), kde je základní dosud otevřenou fundamentální vícefázovou úlohou formulace hydrodynamických sil na bublinu působících. Podle okolností se může bublina pohybovat v různých režimech vzestupu (např. přímočaře, klikatě,

spirálově či nepravidelně). Bublina se může trhat či štěpit nebo naopak koaleskovat - tyto složité a dosud ne zcela pochopené děje, kdy se trhá kontinuum, jsou dalším ožehavým problémem, jak badatelsky, tak svojí praktickou důležitostí. Velikost a postupná rychlost bublin jsou základními návrhovými parametry plynokapalinových aparátů. Závěrečnou fází života bubliny je kolize s hladinou a prasknutí. Jedná se vlastně o proces koalescence dvou plynných objemů oddělených kapalným filmem (např. Ivanov 1988).

V rámci výzkumu v našem Oddělení se na úrovni MIKRO zabýváme rozličnými spolu spjatými problémy: tvorba jednotlivých bublin experiment + teorie, akustika bublin, oscilace bublin, vícefázová CFD simulace, interakce otvorů na patře, vliv chování patra na režim toku v koloně, přístroj na řízenou tvorbu bublin, pohyb bublin kapalinou, koalescence bublin, kolizní dynamika bublin a proces flotace.

Soubor podkladových publikací uchazeče vztahujících se k této tematické oblasti (publikace P1 - P7) se týká jisté podmnožiny problémů, kterými se naše Oddělení zabývá a zahrnuje studium dynamických režimů tvorby bublin na jednom otvoru, interakce dvou otvorů při současné tvorbě bublin, interakce více otvorů na perforovaném patře a podrobnou analýzu pohybu menisku uvnitř otvoru.

Práce P1 se zabývá experimentálním studiem dynamických režimů tvorby bublin na jednom otvoru na perforovaném patře v laboratorní bublané koloně. Tlakový signál  $p(t)$  v plynové komoře pod patrem byl snímán rychlým tlakovým čidlem. Analýza tlakového signálu poskytla informaci o charakteru fluktuací v zásobníku plynu, z čehož lze soudit na režim tvorby bublin na otvoru. Tuto informaci je třeba ještě potvrdit vizuálně - tj. pomocí videa si 'zkalibrovat' strukturu časové řady tlaků. Rychlostní pole kapaliny v koloně bylo měřeno poblíž otvoru jednosměrnou anemometrickou sondou. Analýza rychlostního signálu poskytla informaci o charakteru pohybu původně nehybné kapaliny, která byla uvedena do pohybu vzestupem bublin. Byla měřena intenzita těchto přirozeně indukovaných cirkulací kapaliny se záměrem prozkoumat jejich vliv na dynamiku tvorby bublin. Bylo zjištěno, že v závislosti na hodnotě průtoku plynu  $Q$  zde existují dva základní režimy tvorby bublin, nazvané jako B (bubbling) a J (jetting). Výsledky ukázaly, že pro malé  $Q$  převládá režim B, který odpovídá tvorbě za sebou jdoucích jednotlivých bublin a pro velké  $Q$  převládá režim J, kdy se bubliny tvoří rozpadem jetu plynu vycházejícího z otvoru (jet - proud, paprsek, trysk). Vzájemný přechod mezi režimy B a J při změně parametru  $Q$  není ostrý, ale pozvolný a postupný, kdy oba režimy při daném  $Q$  koexistují v různé statistické proporci. Jedná se o tzv. intermitentní přechod, kdy v odpovídajícím fázovém prostoru existují vedle sebe dva atraktory a řešení systému mezi nimi přeskakuje díky přítomnosti nějakého stochastického děje. Analýza signálů ukázala, že právě flukuační chování cirkulací kapaliny je tímto nahodilým prvkem (vykazuje charakter  $1/f$  šumu), zodpovědným za intermitentní charakter přechodu obou režimů. Tato studie ukázala, že není možné a priori zanedbat přirozené cirkulace kapaliny způsobené pohybem bublin, jak se v literatuře často děje.



Práce P2 navazuje na práci P1 a zabývá se experimentálním studiem dynamických režimů současné tvorby bublin v laboratorní bublané koloně na dvou sousedících otvorech na perforovaném patře se společnou plynovou komorou. Záměrem bylo získat první data o vzájemném ovlivňování procesů tvorby bublin při párové interakci otvorů. Základní měřenou veličinou byl tlakový signál snímaný v komoře pod patrem. Bylo zjištěno, že režimy bublání lze rozdělit do dvou základních typů, synchronní režim S a asynchronní režim A. V režimu S oba otvory pracují simultánně, oba procesy nafukování bublin jsou ve fázi, bubliny se od patra odtrhávají ve stejný časový okamžik a mají shodnou výslednou velikost. Vše ostatní, co nesplňuje tuto definici spadá do typu A. Dále bylo zjištěno, že typ A zahrnuje dva základní podtypy: A1 - pracuje pouze jeden otvor a druhý nikoli, A2 - pracují oba otvory, ale jsou vůči sobě fázově posunuté. Byl studován vliv několika důležitých parametrů na chování systému: průtok plynu  $Q$ , vzdálenost sousedících otvorů  $s$ , průměr kolony  $d$  a výška kapaliny  $h$  v koloně. Bylo zjištěno, že pro malé  $Q$  otvory pracují v režimu S, pro střední hodnoty  $Q$  přechází otvory do režimu A a pro velké  $Q$  se opět vrací do režimu S. Opětná synchronizace pro velké  $S$  byla překvapující - předpokládali jsme, že s rostoucím vstupem energie do systému bude růst míra nepravidelnosti jeho chování. Opětná stabilizace režimu S je dodnes otevřený problém.

Práce P3 navazuje na práci P2 a zabývá se experimentálním studiem dynamických režimů současné tvorby bublin v laboratorní bublané koloně na třech a více otvorech na perforovaném patře se společnou plynovou komorou. Předěšlá studie P2 ukázala, že chování již dvou otvorů může být dodatečně složitě, jak na popis tak na výklad. Cílem tohoto následujícího příspěvku bylo probádat možné režimy tvorby bublin v případě více až mnoha vzájemně se ovlivňujících otvorů, což předtím učiněno nebylo a poskytnout prvotní informaci o komplexitě kolektivních bublacích modů na perforovaných patrech. Byla použita četná patra s různým počtem otvorů a s různou jejich geometrickou konfigurací. Řídicím parametrem těchto pokusů byl průtok plynu  $Q$ , což je prvek při daném patru nejdůležitější. Pro charakterizaci různých režimů bublání byla využita analýza tlakového signálu ze společné zásobní komory plynu pod patrem, s podporou vizuální informace a měření akustických emisí. Bylo zjištěno, že existuje velké množství přirozených modů mnohaotvorového bublání. Tyto mody byly klasifikovány do kvalitativně rozdílných skupin (asi 7 skupin). Rozsáhlý experimentální materiál nám dovolil učinit tyto kvalitativní závěry: synchronní režimy tvorby bublin se vyskytují spíše v geometriích mající jistou symetrii, vzdálenost otvorů je významným faktorem interakce, vliv stěn kolony je významný pro režim otvorů ležících v jejich blízkosti, existují zde rezonanční tendence, hlavní scénář kolektivního chování patra při zvyšujícím se  $Q$  vykazuje jisté univerzální rysy.

Práce P4 navazuje na práce P1-3 a zabývá se experimentálním studiem chování plynokapalinového fázového rozhraní (menisku) uvnitř otvoru na průhledném perforovaném patře. Cílem této studie bylo získat první údaje o dynamice menisku při nafukování bubliny a po jejím odtrhu, neboť to může mít významný vliv na

režimy tvorby bublin. Snahou bylo získat co nejúplnější informaci o systému. V komoře pod patrem byly měřeny tlakové fluktuace  $p(t)$ . V kapalině v koloně nad patrem byl hydrofon, který měřil akustické emise  $a(t)$  bublin. V otvoru patra byl snímán vertikální pohyb menisku  $h(t)$  rychloběžnou kamerou. Jediným řídicím parametrem byl průtok plynu  $Q$ . Experimentální data zachytila zajímavé oscilační chování menisku, které se ukázalo velice důležité pro celý bublací proces. Tento periodický proces byl pracovně rozdělen do několika etap. V grafu závislosti počtu oscilací na průtoku plynu,  $N(Q)$ , byla zjištěna řada 'hysterezních oken', kdy pro pevně dané  $Q$  může systém z blíže neznámých důvodů vykonávat buď  $n$  nebo  $n+1$  oscilací. Byly zjištěny pozice těchto oken a jejich rozměry. Znamená to, že systém za konstatních podmínek má jakýsi vnitřní mechanismus pro generování nejednoznačnosti svého stavu, který má nahodilý charakter. Důsledkem této skutečnosti je to, že délka celého bublacího cyklu výsledný objem bubliny, které se jako prakticky jediné veličiny v literatuře měří, mohou být zatíženy prvkem nahodilosti za jinak deterministických podmínek.

Práce P5 navazuje na práci P4 a zabývá se teoretickým studiem chování menisku uvnitř otvoru na perforovaném patře. Cílem této studie bylo získat fyzikální představu o mechanismech, které ovládají dynamiku menisku při jeho oscilačním chování uvnitř otvoru, které bylo odhaleno a zdokumentováno v předchozí experimentální práci a formulovat ji do matematického modelu. Na základě faktu, že tvorba bubliny je diskontinuální děj, který se skládá ze dvou fyzikálně zcela odlišných procesů, byl náš model koncipován jako dvoustupňový. V etapě A dochází k vlastní tvorbě bubliny na otevřeném otvoru výdechem komory, kdy meniskus není přítomen. V etapě B dochází k oscilačnímu chování menisku uvnitř uzavřeného otvoru, při současném tlakování komory. Popis pohybového stavu menisku vyžaduje podrobnější vyšetření. Ve snaze vyhnout se složitému leč korektnímu popisu z pozic kontinua byla vytvořena náhradní mechanistická představa menisku coby hmotného tělesa ve tvaru válce, který se pohybuje v otvoru podobným způsobem, jako to činí píst ve válci spalovacího motoru. Pro zachování maximální jednoduchosti modelu byly uváženy pouze dvě síly, jedna hnací a jedna odporová. Simulační výpočty prokázaly, že model je schopen reprodukovat oscilační chování menisku a vysvětlit podstatu hystereze odhalené v experimentech.

Práce P6 přímo navazuje na práci P5, je její dalekou extrapolací a v jistém smyslu jejím teoretickým završením. Cílem této práce je pokusit se prokázat analogii mezi chováním dvou různých vícefázových dynamických systémů: tvorbou kapky na kapiláře a tvorbou bubliny na patře. První systém vešel začátkem 80 let ve známost jako 'kapající kohoutek' (dripping/leaky faucet) a stal se archetypem pro demonstraci toho, že fyzikálně jednoduchý systém může vykazovat velmi složité dynamické chování (Shaw 1984, Martien 1985). Problém kapajícího kohoutku byl formulován teoretickými fyziky pracujícími na poli nelineární dynamiky. Základním rysem jednoduchého modelu kohoutku je jeho diskontinuita, kdy konečný stav fáze ( $n$ ) určuje počáteční podmínku pro stav následující ( $n+1$ ).

Podářilo se ukázat, že podobný mechanismus vazby mezi cykly je přítomen i při tvorbě bublin. Tímto způsobem je veden výklad analogie na úrovni fyzikální. Práce P6 však dokazuje analogii i na úrovni formální, tedy jako izomorfii odpovídajících matematických modelů. Je ukázáno, že jádra obou modelů je shodná a lze je vyjádřit jedním limitním popisem (limiting faucet iterator).

Práce P7 navazuje na práce P4-5 a zabývá se experimentálním studiem vlivu různých operačních parametrů na dynamiku menisku uvnitř otvoru na perforovaném patře. Cílem této parametrické studie bylo zmapovat chování menisku a potažmo celého bublacího procesu za různých podmínek, v různých částech parametrického prostoru. Kromě vlivu základního parametru, kterým je průtok plynu  $Q$ , byl zkoumán vliv dalších 5 parametrů, které jsme považovali za důležité. Jedná se o následující veličiny: průměr otvoru  $d$ , tloušťka patra tedy délka otvoru  $L$ , objem plynové komory pod patrem  $V$ , výška sloupce kapaliny v koloně  $H$ , viskozita kapalné fáze  $\mu$ . Rozměry otvoru určují převládající režim chování (kapilární, gravitační, oscilační). Závislost celkové bublací periody  $T$  na průtoku plynu  $Q$  vyhovuje mocninnému zákonu (power law), jehož exponent nepříliš závisí na objemu komory. Na druhé straně, perioda  $T_A$  - doba otevření otvoru, neukazuje výrazný trend vůči  $Q$ , ale roste s objemem komory. Rozsah hysterezních oken výrazně stoupá se zvětšující se komorou. Vliv výšky kapalného sloupce se projevuje tím, že modifikuje charakteristická časová měřítká chování systému. Vliv viskozity se projevuje v tendenci prodlužování časových měřítek systému a tlumení oscilací.

## **2.2 Výzkum na hierarchické úrovni MEZO**

Na obecné úrovni uvažování lze přechod od mikro-informace na makro-úroveň v principu učinit dvěma rozdílnými způsoby, bez mezikroku nebo s mezikrokem. V prvním případě se vezme znalost o chování jedné částice a popř. o charakteru vzájemné interakce dvou částic a tyto informace se vloží jako vstupní data do statistické mechaniky, jejímž výstupem je poznatek o makroskopických vlastnostech souboru jako celku. V druhém případě se postupuje od jedné částice k více částicím postupně, skrze studium omezených jejich souborů (klastry, shluky), které tvoří skutečný fyzikální mezikrok a zabývá se tím relativně mladý vědní obor - fyzika mezoskeju (mesoscale physics). V klastrech se jisté aspekty chování jednotlivých částic do určité míry zachovávají a jiné se postupně vytrácí. Současně s tím se postupně objevují nové kolektivní vlastnosti (collective/emergent properties), až tyto prorostou na makro-úroveň a tam se stabilizují a sejdou se se standardně zavedenými pojmy pro popis makrosvěta (např. v termínech kontinua apod.).

V oblasti vícefázové hydrodynamiky se přechod od jedné dispergované částice k makroskopické disperzi (bulk dispersion) začal ve světě řešit prvním

způsobem tj. statisticky, na základě analogie s již dobře rozvinutým oborem statistické fyziky, která se zabývá velkými soubory malých elementů, obv. mikroskopických částic hmoty (atomy, molekuly). V hydrodynamice se však za tyto elementy považují makroskopické částice (bubliny, kapky, tuhé částice) dispergované v nějaké makroskopické nosné kontinuální tekutině. Jsou zde však jisté rozdíly. Atomární částice jsou v 'prázdném' prostředí zatímco dispergované částice jsou vloženy v nějaké tekutině, spolu s níž se pohybují.

Přibývá zde tedy problém přítomnosti kontinuální fáze, která tvoří dispergační prostředí, a její pohyb. Problém je o to složitější, že pohyb nosné tekutiny je způsoben či do jisté míry ovlivněn také přítomností částic, a naopak, chování těchto částic je zpětně určeno či ovlivněno pohybovým stavem nosné tekutiny. V obecném případě zde tedy máme dvojsměrné vzájemné (silové a jiné) působení (two-way coupling) mezi spojitou (kontinuální) a rozptýlenou (dispergovanou fází).

Důsledkem přítomnosti pohybujícího se kontinua mezi dispergovanými částicemi je, na rozdíl od atomů ve vakuu, extrémně obtížné získat informace o (i) vzájemných silách mezi tekutinou a částicí a (ii) vzájemných silách mezi těmito částicemi, které tekutina zprostředkovává.

Naše volba pro mezoskejlový přístup k plynokapalinovým soustavám spočívala na studiu klastrů (shluků, omezených souborů) bublin se vzájemnými hydrodynamickými interakcemi - tedy cesta s mezikrokem. K této práci je zapotřebí znát formulaci hydrodynamických sil, kterými na sebe bubliny působí. Tyto síly byly známy pouze pro speciální konfigurace bublin, zejm. pro párovou interakci dvou identických kulatých bublin stoupajících za sebou ve vertikální linii. Práce P8 tedy přenesla znalost o chování dvojice částic na chování libovolného jejich souboru - klastru diskretních částic, vertikálního řetězce, který představuje diskretní mezoskejlový model. V navazující práci P9 byl tento diskretní mezoskejlový model (mass-spring system) konvertován pomocí jednoho limitního procesu na spojitý mezoskejlový model (hydrodynamic string) a pak dále pomocí druhého limitního procesu na makroskopický model (1D bulk bubbly chain flow). Bylo zde tedy použito dvou mezikroků v pásmu mezoskejlu.

Práce P8 se zabývá konstrukcí teoretického modelu popisujícího hydrodynamické interakce ve vertikálním 1D řetězci identických sférických bublin a jeho řešením, které dává různé dynamické režimy chování řetězců za různých podmínek. Síly pro párovou interakci jsou dvě. Nevazká síla je známa z potenciálního toku a je symetrická a krátkodosahová (short-range). Vazká síla byla nově publikována (Oguz 1993), je asymetrická a dalekodosahová (long-range). Pohybové rovnice jsou newtonskými zákony sil pro jednotlivé bubliny. Párové síly jsou přeneseny na celý řetězec a jsou uvedeny dvě formulace: pro interakce pouze nejbližších sousedů (nearest-neighbour approximation) a pro sousedy vzdálenější (distant/non-local effects). Jsou uvažovány dvě okrajové podmínky na řetězci: volných konců (free end chain) a pevných konců (fixed end chain). Numerické řešení modelu bylo zaměřeno na existenci rovnovážných stavů klastrů bublin různých velikostí a počátečních konfigurací, jejich stabilitu, šíření vln po řetězci,

apod. Modelem byly předpovězeny zajímavé dynamické režimy (pairing-off, re-pairing, stable oscillations, atd.), z nichž některé již byly ve vícefázových experimentech pozorovány.

Práce P9 přímo navazuje na P8 a je jejím pokračováním. Je zde řešena zásadní problematika: jak přejít od mikro na makro, skrze mezo, a vyhnout se statistickým přístupům. Práce má dvě dějové roviny. První z nich je odvození pohybových rovnic pro vertikální klastr (řetězec) hydrodynamicky interagujících dispergovaných částic na třech různých délkových škálách. Druhou z nich je detailní vyšetření stability rovnovážného stavu těchto tří modelů, v lineárním přiblížení.

Na mikro-měřítku byly odvozeny pohybové rovnice popisující klastr diskretních bublin, tak jak je můžeme pozorovat v laboratoři, jako "mass-spring-system", tedy jako hmotné částice propojené 'hydrodynamickými' pružinami. Tyto rovnice byly linearizovány, čímž byly rozklíčovány dvě základní síly, vazká a setrvačná, jakož i jejich závislost na souřadnici a rychlosti, a byly studovány stabilitní rysy jednotlivých komponent. Na mezo-měřítku byly získány pohybové rovnice pomocí limitního procesu vzetí spojité limity diskretního řetězce, což bylo inspirováno postupem, kterým se v mechanice odvozuje vlnová rovnice pro strunu ze soustavy kmitajících diskretních částic spojených pružinami. Zde je na hydrodynamický klastr pohlíženo jako na analog 1D mechanické struny. Diskutuje se charakter a působení jednotlivých silových komponent, řeší se disperzní rovnice pro vlnové pohyby generované různými kombinacemi komponent, konstruuje se stabilitní digramy. Na makro-měřítku je uvažován soubor identických synchronně pracujících vertikálních řetězců stoupajících rovnoběžně vedle sebe, tj. kolekce hydrodynamických strun. Jedná se tedy o bubbly chain bulk flow. Nejprve je zavedena spojitá 1D koncentrace bublin podél struny pomocí jejich rozteče, potřebná pro formulaci rovnice kontinuity, jenž je následně zapsána. Dále je zapsána i rovnice pohybová, která se získá z mezoskejšlového modelu struny tím, že souřadnici vyjádříme pomocí koncentrace. Máme tedy spojitý makroskopický model jistého abstrakního 3D případu popsany dvěma parciálními rovnicemi pro zachování hmoty a hybnosti. Je studován pohyb kinematických a dynamických vln v tomto dispergovaném systému a stabilita homogenního stavu.

### **2.3 Výzkum na hierarchické úrovni MAKRO**

Makroskopická úroveň je zde chápána jako chování vícefázového aparátu jako celku. Typickým reprezentantem takového aparátu pro nás bude probublávaná kolona. Studovaným aspektem pak bude hydrodynamické chování plynokapalinové směsi v koloně. Podkladové práce P10-P17 tvoří kompaktní soubor dílčích studií zabývajících se touto problematikou. Soubor prací má následující logickou strukturu. Přehledná práce P10 je symbolickým završením starého eonu týkající se hydrodynamiky kolon, tokovými režimy a jejich

vlastnostmi. Práce P11 je pak začátkem eonu nového, prvním krokem v novém směru přístupu k řešení problému tokových režimů. Jádrem práce je aproximativní jednoduchá, ale fyzikálně podložená, kinematická teorie podstaty existence režimů a jejich přechodu, včetně jejího rozsáhlého experimentálního ověření a potvrzení. Práce P12 pokračuje tímtež směrem a přináší další podstatný posun v teoretickém pochopení fyzikálních mechanismů stability režimů a jejich přechodu, kde jsou tyto dynamické úvahy o stabilitě opět úspěšně experimentálně podepřeny. Následující serie prací P13-17 se zabývá intenzivním experimentálním studiem tokových režimů, jejich stabilitou a přechody se zaměřením na prozkoumání vlivu důležitých operačních parametřů na chod kolony, vždy se zřetelem a vazbou na předcházející teoretické koncepce vyvinuté v P11-12.

Práce P10 je v podstatě stručný přehledový článek opírající se hlavně o výsledky získané v našem Oddělení, které jsou souhrnně prezentovány, usazeny do širšího kontextu informací z literatury a doplněny výkladem, názory a hypotézami o podstatě věcí, do míry jak bylo v té době možno. Práce je plně věnována dvěma základním režimům toku v kolonách, homogennímu (HoR) a heterogennímu (HeR). Postupně jsou probírány důležité aspekty této duality obou režimů a jejich vliv na chování kolon z různých důležitých hledisek. Jedná se např. o promíchávání vsádky i jednotlivých fází, rozložení dob prodlení v těchto tokových soustavách, závislost mezi zádrží plynu a mimovrstvovou rychlostí, hodnoty transportních koeficientů pro sdílení hmoty, vliv rozměrů kolony, vliv distributoru plynu, vliv vlastností fází, apod. Práce rovněž obsahuje velice stručný úvod do elementárních modelových představ, se kterými v té době pracovalo a které odpovídaly stavu tehdejších znalostí. P10 je odrazový můstek pro další bádání v daném oboru a tvoří jakousi základní čáru, od které se pokrok odvozuje dále.

Práce P11 navazuje na P10 a shrnuje stav znalostí v oblasti chování režimů, ale již z nové perspektivy. Úvodem jsou vysloveny definice obou režimů, shrnuty jejich základní vlastnosti, učiněno provnání a stanoveno v čem se ve své fyzikální podstatě a projevech liší. Tyto údaje jsou pak dveřmi k formulaci jednoduchého modelu založeného na úvahách za použití bilance hmoty (tj. koncept kinematický) o vzájemném působení fází v koloně. Úhelným kamenem je zde koncept darwinovského driftu. Jedná se o to, jaký objem tekutiny je fyzicky přemístěn v prostoru tokové domény, vlivem pohybu nějakého tělesa v této doméně (Darwin 1953). Tento objem (drift volume) se vyjadřuje v jednotkách objemu pohybující se tělesa (koeficient driftu). Podařilo se formulovat model pro HoR, získat kritérium jeho stability a navíc odvodit teoretickou formuli pro relativní rychlost fází (slip speed), což je jev velice zřídka (obv. jsou tyto formule ryze empirické či nejvýše semi-empirické). Model pro HeR byl získán formálně a jeho tvar odpovídá řadě empirických vztahů v literatuře. Model a jeho predikce byly důkladně experimentálně testovány a výsledky jsou uspokojivé.

Práce P12 navazuje na práci P11 a rozpracovává problematiku stability HoR do podstatně větší hloubky. Zvolili jsme alternativní postup, založený na fyzikální

analogii našeho systému s jednofázovým problémem Rayleigh-Benardovy tepelné konvekce v tekutině mezi dvěma horizontálními deskami. Existence fyzikální analogie je založena na absenci (konduktivní režim) či prezenci (konvektivní režim) makroskopických cirkulací (large-scale motions, Benard cells) v systému, kdy přechod nastává při jisté kritické hodnotě Rayleighova čísla  $Ra$ , které je bifurkačním parametrem tepelné úlohy. Tomu odpovídá intenzita toku plynu do bublané vrstvy. Dalším krokem bylo zavedení  $Ra$  pro vícefázové systémy, což se podařilo díky jeho fyzikální interpretaci (Busse 1978). Na základě existující analogie pak bylo možné postulovat, že struktura výrazu pro hodnotu kritického  $Ra_c$  (bifurkační hodnota) v tepelné konvekci bude stejná jako pro práh nestability v přechodu HoR  $\rightarrow$  HeR disperzní vrstvě. Tím bylo získáno prediktivní kritérium stability HoR, které posléze bylo experimentálně ověřeno.

Práce P11 a P12 vytvořily novou platformu pro uchopení duality tokových režimů v bublaných kolonách a tím také široký prostor pro kvalifikovanou interpretaci experimentálních dat týkajících se režimů a jejich přechodu. Velkým problémem publikovaných dat o režimech včetně těch, které pocházela z předešlých dob i z našeho Oddělení bylo, že byla příliš hrubá na zodpovědné a spolehlivé vyhodnocení kritického bodu (práh nestability HoR - začátek jeho postupného přechodu do HeR: souřadnice  $e_c$  a  $q_c$  v základním grafu zádrže  $e$  proti rychlosti vstupujícího plynu  $q$ ). Většina prací se problematikou stability přímo nezabývala, a spíše konstatovala, že tam mohou být dva režimy, a že bod přechodu je možné nějakým způsobem určit či odhadnout. Data byla nepřesná a řídká, metody stanovení bodu přechodu byly primitivní, kvalitativní, neadekvátní a chybné. Proto bylo třeba začít vypracováním solidních postupů pro určení kritického bodu z naměřených dat. Dále pak provedením detailních experimentů zaměřených výlučně na stabilitní studie. V rámci těchto experimentů pak postupně a systematicky prostudovat vliv důležitých operačních parametrů na tokové režimy v koloně a spolehlivé vymezení oblastí jejich výskytu, což má kromě akademického významu také velký přínos praktický. Toto vše bylo vykonáno v rámci prací P13 - P17.

Práce P13 je zaměřena na výzkum vlivu základního návrhového parametru na chování kolony z hlediska režimů toku, totiž na velikost kolony. V důkladné literární rešerši bylo shledáno, že ačkoli je tento parametr zcela zásadní, dosud nebyla provedena systematická studie zaměřená na vliv rozměrů kolon na stabilitu HoR. To bylo učiněno až v P13. Byly použity válcové kolony o 3 různých průměrech a 12 různých výškách a základní modelový systém fází voda-vzduch. Výsledky jasně ukázaly destabilizující vliv rostoucích rozměrů kolony. To je v naprostém souladu s naší teorií v P12, která byla tímto experimentálně potvrzena.

Práce P14 je zaměřena na výzkum vlivu základního materiálového parametru fází na chování kolony z hlediska režimů toku, totiž na viskozitu kapalné fáze. Jako modelová kapalina byl použit systém voda-glycerol, který má dobře popsané jednoduché reologické chování, není drahý, je zdravotně nezávadný a dobře se s

ním pracuje. Výsledky ukázaly, že viskozita typicky destabilizuje HoR a že pokles stability má mocninný charakter (power law). Literatura zmiňovala nepříznivý vliv viskozity na homogenní zádrž, což se vykládalo zvýšenou tendencí ke koalescenci ve vazkých vsádkách. Z poklesu zádrže se pak usuzovalo na potlačení HoR. To byly hypotézy, dílčím způsobem podpořené experimentálními daty, které bylo třeba prokázat. Tak se stalo v P14 s tím, že byl odhalen duální vliv viskozity: stabilizace pro velmi slabě vazké vsádky a destabilizace pro jiné.

Práce P15 je zaměřena na výzkum vlivu přítomnosti třetí fáze (tuhých částic) na chování kolony z hlediska režimů toku. Literární údaje o vlivu třetí fáze na chování bublané kolony jsou sice velice četné, ale zcela nekonzistentí a rozporuplné. P15 je patrně první podrobná studie věnovaná stabilitě HoR ve třífázovém systému. Jako tuhé částice byly použity alginátové pelety. Výsledky ukázaly, že přítomnost částic má jak na zádrž plynu tak na stabilitu HoR dvojjaký vliv: stabilizuje pro nízké koncentrace částic a destabilizuje pro vyšší, tedy podobně jako viskozita. Tímto nálezem byla usmířena různá rozporná data v literatuře: duální vliv opravdu existuje.

Práce P16 je zaměřena na výzkum vlivu přítomnosti povrchově aktivní látky (surfaktantu) na chování kolony z hlediska režimů toku. Problematika povrchových záležitostí je v plynokapalinových systémech naprosto klíčová a je převelice obtížná. I malé, zcela nepatrné, množství povrchového 'kontaminantu', které se nachází pod detekčními limity, může zcela změnit charakter vrstvy a její chování. Náš pracovní surfaktant byl jednoduchý elektrolyt,  $\text{CaCl}_2$ , o kterém bylo známo, že má na chování vrstvy a na přechody výrazný vliv. Výsledky ukázaly, že tato látka má opět duální vliv, jak na hodnotu zádrže, tak na stabilitu HoR.

Práce P17 pak provedla pokusy i s jinými typy solí (volba různého poměru valence aniont/kationt) aby potvrdila, že výsledky získané v P16 nejsou specifické pouze pro  $\text{CaCl}_2$ , ale jsou typické pro širší třídu elektrolytů, což se také stalo.

Experimentálně zjištěná přítomnost duálního efektu u několika kontrolních parametrů, které předtím nebylo detekováno, je velkou výzvou pro teoretické vyložení tohoto zajímavého jevu, který předtím nebyl popsán. V současné době probíhají dílčí studie na vyšetření fyzikálních mechanismů zodpovědných za toto chování.



### **3. Závěry dizertace**

Podářilo se navázat na dlouhou a významnou tradici založenou a vybudovanou našimi předchůdci, která měla místní i mezinárodní odezvu a uznání.

Byly osvojeny nové přístupy k víceřázovému výzkumu, které umožnily na kvalitativně vyšší úrovni pojmut problém a zvolit nové efektivní metody řešení. Konkrétně se jedná o důslednou implementaci fyzikálních principů do chemicko-inženýrského přístupu k plynokapalinovým soustavám, která se opírá o podstatně hlubší teoretické zázemí, než měla k dispozici generace předešlá.

Došlo k narovnání proporcí mezi podílem práce experimentální, teoretické a simulační (CFD) v našem Oddělení, neboť dříve se vycházelo prakticky pouze z experimentu.

Výrazným progresivním aspektem našeho výzkumu je důsledná aplikace škálového přístupu k řešeným problémům.

Podářilo se překlenout personálně velice nepříznivé období, které hrozilo narušit kontinuitu víceřázového výzkumu v našem Oddělení. Situace byla stabilizována jak po stránce množství a kvality mladých vědeckých pracovníků, tak po stráce vytvoření slušně vybaveného laboratorního zázemí.

Získané vědecké výsledky byly pozitivně přijaty na mezinárodní scéně a vytvořily nám dobrou reputaci, která nás činí hodnými státi se pokračovateli tradice.

#### **4. Publikace tvořící podklad dizertace**

Podkladem dizertace jest následujících 17 publikací (P1 - P17) v pěti různých mezinárodních recenzovaných a impaktovaných časopisech (J1 - J5). Tyto časopisy představují kvalitní publikační média v našem oboru chemického inženýrství a vícefázové hydrodynamiky (abecedně):

J1. Chemical Engineering Journal IF = 3.1  
(Elsevier Science, Switzerland)

J2. Chemical Engineering Research and Design IF = 1.5  
(Institute of Chemical Engineers,  
Official Journal of the European Federation  
of Chemical Engineering, England)

J3. Chemical Engineering Science IF = 2.4  
(Pergamon-Elsevier Science, England)

J4. Industrial and Engineering Chemistry Research IF = 2.1  
(American Chemical Society, USA)

J5. International Journal of Multiphase Flow IF = 1.8  
(Pergamon-Elsevier Science, England)

Počty citací jednotlivých článků jak byly získány z databáze "Web of Science" (Thomson-Reuters) jsou uvedeny v hranaté závorce [ ] pod odkazem. Některé práce jsou poměrně nedávné a tudíž se ještě do citačního kola nedostaly. Výpis byl proveden 20. září 2011.

P1. Růžička M., Drahoš J., Zahradník J., Thomas N. H.: Intermittent transition from bubbling to jetting regime in gas-liquid two phase flows. *Int. J. Multiphase Flow* 23, 671-682 (1997).

[21]

P2. Růžička M., Drahoš J., Zahradník J., Thomas N. H.: Structure of gas pressure signal at two-orifice bubbling from a common plenum. *Chem. Eng. Sci.* 55(2), 421-429 (2000).

[14]

P3. Růžička M., Drahoš J., Zahradník J., Thomas N. H.: Natural modes of multi-orifice bubbling from a common plenum. *Chem. Eng. Sci.* 54(21), 5223-5229 (1999).

**[6]**

P4. Růžička M., Bunganič R., Drahoš J.: Meniscus Dynamics in Bubble Formation. Part I: Experiment. *Chem. Eng. Res. Des.* 87(10), 1349–1356 (2009).

**[4]**

P5. Růžička M., Bunganič R., Drahoš J.: Meniscus Dynamics in Bubble Formation. Part II: Model. *Chem. Eng. Res. Des.* 87(10), 1357-1365 (2009).

**[3]**

P6. Růžička M.: Dripping Faucet and Bubbling Faucet: An Analogy. *Chem. Eng. Res. Des.* 87(10), 1366–1370 (2009).

**[3]**

P7. Stanovský P., Růžička M., Martins A., Teixeira J.A.: Meniscus Dynamics in Bubble Formation: A Parametric Study. *Chem. Eng. Sci.* 66(14), 3258-3267 (2011).

**[0]**

P8. Růžička M.: On bubbles rising in line. *Int. J. Multiphase Flow* 26, 1141-1181 (2000).

**[24]**

P9. Růžička M.: Vertical Stability of Bubble Chain: Multiscale Approach. *Int. J. Multiphase Flow* 31(10-11), 1063-1096 (2005).

**[5]**

P10. Zahradník J., Fialová M., Růžička M., Drahoš J., Kaštánek F., Thomas N. H.: Duality of the gas-liquid regimes in bubble column reactors. (Eng) *Chem. Eng. Sci.* 52, 3811-3826 (1997).

**[100]**

P11. Růžička M., Zahradník J., Drahoš J., Thomas N.H.: Homogeneous-Heterogeneous Regime Transition in Bubble Columns. (Eng) *Chem. Eng. Sci.* 56(15), 4609-4626 (2001).

**[52]**

P12. Růžička M., Thomas N.H.: Buoyancy-Driven Instability of Bubbly Layers: Analogy with Thermal Convection. (Eng) *Int. J. Multiphase Flow* 29(2), 249-270 (2003).

**[18]**

P13. Růžička M., Drahoš J., Fialová M., Thomas N.H.: Effect of Bubble Column Dimensions on Flow Regime Transitions. (Eng) Chem. Eng. Sci. 56(21-22), 6117-6124 (2001).

**[35]**

P14. Růžička M., Drahoš J., Mena P.C., Teixeira J.A.: Effect of Viscosity on Homogeneous-Heterogeneous Regime Transition in Bubble Columns. (Eng) Chem. Eng. J. 96(1-3), 19-26 (2003).

**[31]**

P15. Mena P.C., Růžička M., Rocha F.A., Teixeira J.A., Drahoš J.: Effect of Solids on Homogeneous-Heterogeneous Flow Regime Transition in Bubble Columns. (Eng) Chem. Eng. Sci. 60(22), 6013-6026 (2005).

**[15]**

P16. Růžička M., Večeř M., Orvalho S.P., Drahoš J.: Effect of Surfactant on Homogeneous Regime Stability in Bubble Column. (Eng) Chem. Eng. Sci. 63(4), 951-967 (2008).

**[11]**

P17. Orvalho S.P., Růžička M., Drahoš J.: Bubble Column with Electrolytes: Gas Holdup and Flow Regimes. (Eng) Ind. Eng. Chem. Res. 48(18), 8237-8243 (2009).

**[1]**

## **5. Celková publikační činnosti uchazeče**

Uvedené údaje pochází jak z vědecké databáze "Web of Science" (Thomson-Reuters) tak z interní publikační databáze PUBLIK-ÚCHP našeho ústavu, kam se vkládají naše prověřené publikační výstupy, a která je podkladem pro export těchto dat do nadřazených databází ASEP a RIV. Výpis byl proveden 20. září 2011.

### **Citační údaje o časopiseckých publikacích** (zdroj: Web of Science)

Results found:	28
Sum of the Times Cited:	386
Sum of Times Cited without self-citations:	338
Citing Articles:	242
Average Citations per Item:	13.8
H-index:	11

### **Celková publikační statistika uchazeče** (zdroj: Web of Science + PUBLIK-ÚCHP)

Články v mezinárodních časopisech: počet kusů 28, celkový počet tiskových stran 359, součet impakt-faktorů 61, počet citací celkový 386, bez autocitací 338, z toho přehledné články 1,

Kapitoly v knihách: 5, celkový počet tiskových stran 80

Teze: 13

Patenty: 2

Mezinárodní konference: 235

Národní konference: 14

Výzkumné zprávy: 7

Celkový počet tiskových stran (recenzovaná zahraniční média: časopisy+knihy): 439

### **Použité mezinárodní recenzované a impaktované časopisy** (abecedně)

Catalysis Today IF = 3.0

Fluid Dynamics Research IF = 1.1

Chemical Engineering Journal IF = 3.1

Chemical Engineering Research and Design IF = 1.5

Chemical Engineering Science IF = 2.4

Industrial and Engineering Chemistry Research IF = 2.1

International Journal of Multiphase Flow IF = 1.8

Physica A IF = 1.5

Water Research IF = 4.6

**Original papers**

1. Růžička M., Fridrich M., Burkhard M.: Bacterial colony is not self-similar. (Eng) *Physica A* 216, 382-385 (1995).
2. Růžička M.: An extension of the Mosey model. (Eng) *Water Res.* 30(10), 2440-2446 (1996).
3. Růžička M.: Effect of hydrogen on the acidogenic glucose cleavage. (Eng) *Water Res.* 30(10), 2447-2451 (1996).
4. Růžička M., Drahoš J., Zahradník J., Thomas N. H.: Intermittent transition from bubbling to jetting regime in gas-liquid two phase flows. (Eng) *Int. J. Multiphase Flow* 23, 671-682 (1997).
5. Zahradník J., Fialová M., Růžička M., Drahoš J., Kaštánek F., Thomas N. H.: Duality of the gas-liquid regimes in bubble column reactors. (Eng) *Chem. Eng. Sci.* 52, 3811-3826 (1997).
6. Růžička M., Drahoš J., Zahradník J., Thomas N. H.: Natural modes of multi-orifice bubbling from a common plenum. (Eng) *Chem. Eng. Sci.* 54(21), 5223-5229 (1999).
7. Růžička M.: On bubbles rising in line. (Eng) *Int. J. Multiphase Flow* 26, 1141-1181 (2000).
8. Růžička M., Drahoš J., Zahradník J., Thomas N. H.: Structure of gas pressure signal at two-orifice bubbling from a common plenum. (Eng) *Chem. Eng. Sci.* 55(2), 421-429 (2000).
9. Růžička M., Drahoš J., Fialová M., Thomas N.H.: Effect of Bubble Column Dimensions on Flow Regime Transitions. (Eng) *Chem. Eng. Sci.* 56(21-22), 6117-6124 (2001).
10. Růžička M., Zahradník J., Drahoš J., Thomas N.H.: Homogeneous-Heterogeneous Regime Transition in Bubble Columns. (Eng) *Chem. Eng. Sci.* 56(15), 4609-4626 (2001).
11. Höller V., Růžička M., Drahoš J., Kiwi-Minsker L., Renken A.: Acoustic and Visual Study of Bubble Formation Processes in Bubble Columns Staged with Fibrous Catalytic Layers. (Eng) *Catal. Today* 79-80, 151-157 (2003).
12. Růžička M., Drahoš J., Mena P.C., Teixeira J.A.: Effect of Viscosity on Homogeneous-Heterogeneous Regime Transition in Bubble Columns. (Eng) *Chem. Eng. J.* 96(1-3), 19-26 (2003).
13. Růžička M., Thomas N.H.: Buoyancy-Driven Instability of Bubbly Layers: Analogy with Thermal Convection. (Eng) *Int. J. Multiphase Flow* 29(2), 249-270 (2003).
14. Mena P.C., Růžička M., Rocha F.A., Teixeira J.A., Drahoš J.: Effect of Solids on Homogeneous-Heterogeneous Flow Regime Transition in Bubble Columns. (Eng) *Chem. Eng. Sci.* 60(22), 6013-6026 (2005).
15. Růžička M.: Vertical Stability of Bubble Chain: Multiscale Approach. (Eng) *Int. J. Multiphase Flow* 31(10-11), 1063-1096 (2005).

16. Hladil J., Růžička M., Koptíková L.: Stromatactis Cavities in Sediments and the Role of Coarse-Grained Accessories. (Eng) Bull. Geosci. 81(2), 123-146 (2006).
17. Růžička M.: On Buoyancy in Dispersion. (Eng) Chem. Eng. Sci. 61(8), 2437-3446 (2006).
18. Hladil J., Koptíková L., Růžička M., Kulaviak L.: Experimental Effects of Surfactants on the Production of Stromatactis-shaped Cavities in Artificial Carbonate Sediments. (Eng) Bull. Geosci. 82(1), 37-50 (2007).
19. Růžička M., Večeř M., Orvalho S.P., Drahoš J.: Effect of Surfactant on Homogeneous Regime Stability in Bubble Column. (Eng) Chem. Eng. Sci. 63(4), 951-967 (2008).
20. Šimčík M., Růžička M., Drahoš J.: Computing the Added Mass of Dispersed Particles. (Eng) Chem. Eng. Sci. 63(18), 4580-4595 (2008).
21. Vejražka J., Fugasová M., Stanovský P., Růžička M., Drahoš J.: Bubbling Controlled by Needle Movement. (Eng) Fluid Dyn. Res. 40(7-8), 521-533 (2008).
22. Orvalho S.P., Růžička M., Drahoš J.: Bubble Column with Electrolytes: Gas Holdup and Flow Regimes. (Eng) Ind. Eng. Chem. Res. 48(18), 8237-8243 (2009).
23. Růžička M.: Dripping Faucet and Bubbling Faucet: An Analogy. (Eng) Chem. Eng. Res. Des. 87(10), 1366–1370 (2009).
24. Růžička M., Bunganič R., Drahoš J.: Meniscus Dynamics in Bubble Formation. Part I: Experiment. (Eng) Chem. Eng. Res. Des. 87(10), 1349–1356 (2009).
25. Růžička M., Bunganič R., Drahoš J.: Meniscus Dynamics in Bubble Formation. Part II: Model. (Eng) Chem. Eng. Res. Des. 87(10), 1357-1365 (2009).
26. Vejražka J., Večeř M., Orvalho S.P., Sechet P., Růžička M., Cartellier A.: Measurement Accuracy of a Mono-fiber Optical Probe in a Bubbly Flow. (Eng) Int. J. Multiphase Flow 36(7), 533-548 (2010).
27. Stanovský P., Růžička M., Martins A., Teixeira J.A.: Meniscus Dynamics in Bubble Formation: A Parametric Study. (Eng) Chem. Eng. Sci. 66(14), 3258-3267 (2011).
28. Šimčík M., Mota A., Růžička M., Vicente A., Teixeira J.: CFD Simulation and Experimental Measurement of Gas Holdup and Liquid Interstitial Velocity in Internal Loop Airlift Reactor. (Eng) Chem. Eng. Sci. 66(14), 3268-3279 (2011).
29. Kulaviak T., Hladil J., Růžička M., Drahoš J.: Patterns Formation in Sedimentary Deposit. (Eng), submitted.
30. Růžička M.: Stability of Bubble Column. (Eng), submitted.

## Review papers

1. Růžička M.: On Dimensionless Numbers. (Eng) Chem. Eng. Res. Des. 86(8A), 835-868 (2008).

## Chapters in books

1. Růžička M., Fridrich M., Burkhard M.: Fractal Growth of Bacterial Colonies. (Eng) In: Fractal Reviews in Natural and Applied Sciences. (Novak, M.M., Ed.), pp. 179-191, Chapman&Hall, London 1995.
2. Drahoš J., Růžička M., Pěnkavová V., Serio C.: Chaotic Dynamic of Bubble Formation in a Pool of Liquid. (Eng) In: Fractal and Chaos in Chemical Engineering (Proc. of the Int. CFIC 96 Conf., Rome, Italy, 2-5 September 1996). (Eng). (Giona, M. - Biardi, A., Ed.), pp. 397-408, World Scientific Publishing, Singapore 1997.
3. Drahoš J., Růžička M.: Time Series Analysis in Characterization of Process Data. (Eng) In: 8th Conference of Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction Pres'05. (Klemeš, J., Ed.), pp. 607-613, AIDIC Servizi S.r.l., Milano.
4. Hladil J., Růžička M.: Stromatactic Patterns Formation in Geological Sediments: Field Observations versus Experiments. (Eng) In: Particle-Laden Flow. From Geophysical to Kolmogorov Scales. (Geurts, B.J. - Clercx, H.J.H. - Uijtewaal, W.S.J., Ed.), pp. 85-94, Springer, Dordrecht 2007. [13111]
5. Wichterle K., Růžička M.: Scale-up Fundamentals. (Eng) In: Scale-up in Metallurgy. (Lackner, M., Ed.), pp. 21-58, ProcessEng Engineering GmbH, Viena 2010.

## Theses

1. Růžička M.: Fluidní bioreaktory pro čištění odpadních vod. (Czech) Fluidized-Bed Bioreactors for Wastewater Treatment. Diploma Thesis, VŠCHT Praha, Praha 1984.
2. Růžička M.: Náhoda a nutnost ve vědě. Teze aspirantského kursu. (Czech) Chance and Necessity in Science. Thesis, Ústav chemických procesů AV ČR, Praha 1985.
3. Růžička M.: Biologické reaktory. Teze aspirantského kursu. (Czech) Biological Reactors. Thesis, Ústav chemických procesů AV ČR, Praha 1986.
4. Růžička M.: Enzymy pro likvidaci odpadů. Diplomová práce postgraduálního kursu "Enzymové inženýrství". (Czech) Enzymes for Waste Removal. Thesis, Ústav chemických procesů AV ČR, Praha 1988.
5. Růžička M.: Bioplynový proces - 3 úlohy z acidogeneze. Kandidátská disert. práce, ČSAV, Praha. (Czech) Biogas process - three problems of acidogenesis. Ph. D. Thesis, Czech. Acad. Sci, Prague. (1990).
6. Růžička M.: Škálové aspekty vícefázové hydrodynamiky plynokapalinových soustav. (Czech) Multi-Scale Aspects of Multi-Phase Hydrodynamics of Gas-Liquid Systems. Habilitační práce Thesis, Fakulta chemicko-inženýrská, VŠCHT Praha, Praha 2005.



7. Růžička M.: Taxace učebních úloh z mého oboru. Závěrečná práce (teze) modulu "Vysokoškolská pedagogika - učební úlohy", Kurz VYSPA-Vysokoškolská pedagogika. (Czech) The Taxation of Learning Tasks in my Teaching Area. ING-PAED IGIP Thesis, Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., Praha 2007.
8. Růžička M.: Virtuální úvaha o svobodě. Závěrečná práce (teze) modulu "Asertivita", Kurz VYSPA-Vysokoškolská pedagogika. (Czech) A Virtual Essay on Freedom. ING-PAED IGIP Thesis, Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., Praha 2008.
9. Růžička M.: Popis konfliktu v mé VŠ výuce. Závěrečná práce (teze) modulu "Biologické základy učení", Kurz VYSPA-Vysokoškolská pedagogika. (Czech) The Description of a Conflict in my College Teaching. ING-PAED IGIP Thesis, Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., Praha 2008.
10. Růžička M.: Návrh laboratorního řádu. Závěrečná práce (teze) modulu "Laboratorní didaktika", Kurz VYSPA-Vysokoškolská pedagogika. (Czech) A Proposal of Laboratory Regulations. ING-PAED IGIP Thesis, Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., Praha 2008.
11. Růžička M.: Kvalitativní průzkum: případová studie. Závěrečná práce (teze) modulu "Sociologie", Kurz VYSPA-Vysokoškolská pedagogika. (Czech) The Qualitative Search: a Case Study. ING-PAED IGIP Thesis, Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., Praha 2008.
12. Růžička M.: Transformace textu. Závěrečná práce (teze) modulu "Tvorba srozumitelného textu", Kurz VYSPA-Vysokoškolská pedagogika. (Czech) The Transformation of Technical Text. ING-PAED IGIP Thesis, Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., Praha 2008.
13. Růžička M.: Tři témata z vysokoškolské psychologie. Závěrečná práce (teze) modulu "Vybrané kapitoly z psychologie", Kurz VYSPA-Vysokoškolská pedagogika. (Czech) Three Topics from the College Psychology. ING-PAED IGIP Thesis, Centrum pro studium vysokého školství, v.v.i., Praha 2008.

## Patents

1. Kašťánek F., Urbánek B., Růžička M., Bažant V., Havlín V., Kratochvíl J., Čermák J., Červenka J.: Kolonový reaktor na intenzivní výrobu bioplynu z kejdy. (Czech) Column reactor for production of biogas from liquid manure. Czech. Pat. 274 817 (1991).
2. Růžička M.: Způsob likvidace odpadů obsahujících celulosu metanovým kvašením. (Czech) A process for removal of cellulose containing wastes by methane fermentation. Czech. Pat. AO 270037 (1991).

**International conferences: 235 ks**

**Local conferences: 14 ks**

**Research reports: 7 ks**

## **6. Seznam literatury použité v dizertaci**

Almanach 1960-2010. Materiál vydaný k 50. výročí založení ÚCHP AVČR, Hanika J. a kol. (Eds.), ÚCHP Praha 2010. (obsahuje cenné historické postřehy a svědectví)

Barenblatt 1996 Scaling, self-similarity, and intermediate asymptotics. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

Batchelor G.K. 1988 A new theory of the instability of a uniform fluidized bed. J. Fluid Mech. 193, 75-110.

Benjamin T.B. 1986 Note on added mass and drift. J. Fluid Mech. 169, 251-256.

Biesheuvel A., Wijngaarden L. van 1984 Two-phase flow equations for a dilute dispersion of gas bubbles in liquid. J. Fluid Mech. 148, 301-318.

Brennen C.E. 1995 Cavitation and bubble dynamics. Oxford UP, New York.

Brennen C.E. 2005 Fundamentals of multiphase flow. Cambridge University Press.

Brown P.H., Burbeck C.A. 1999 Measuring perceived 3D shape at multiple spatial scales. Vision Research 39, 1833-1845.

Cuenot B., Magnaudet J., Spennato B. 1997 The effects of slightly soluble surfactants on the flow around a spherical bubble. J. Fluid Mech. 339, 25-53.

Darwin C.G. 1953 A note on hydrodynamics. Proc. Camb. Phil. Soc. 49, 342-354.

Deckwer W.D. 1992 Bubble column reactors. J. Wiley, Chichester.

Drahoš J., Ruzicka M., Penkavová V., Serio C. 1997 Chaotic dynamics of bubble formation in a pool of liquid. In: Giona, M., Biardi, G. Eds.: Fractals and Chaos in Chemical Engineering, World Scientific, Singapore. (pp 397-408)

Drazin P.G., Reid W.H. 1981 Hydrodynamic stability. Cambridge University Press.

Edwards D.A., Brenner H., Wasan D.T. 1991 Interfacial Transport Processes and Rheology. Butterworth-Heinemann, Boston, MA.

Fawcett W.R. 2004 Liquids, solutions, and interfaces. Oxford University Press.

Fermi E., Pasta J., Ulam S. 1955 Studies of non linear problems. Los Alamos Document LA-1940 (May 1955). See also: Enrico Fermi – Collected papers, vol. 2, pp 978-988, University Chicago Press, 1965.

Filippov A.F. 1988 Differential equations with discontinuous right-hand sides. Kluwer, Dordrecht.

Hallez Y., Legendre D. 2011 Interaction between two spherical bubbles rising in a viscous liquid. J. Fluid Mech. 673, 406-431.

Happel J., Brenner H. 1965 Low Reynolds number hydrodynamics. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

Hilborn R.C. 1994 Chaos and nonlinear dynamics. Oxford UP, New York.

Hill T.L. 2002 Thermodynamics of small systems. Dover.

Chandrasekhar S. 1961 Hydrodynamic and hydromagnetic stability. Oxford University Press.

Ivanov I.B. (Ed.) 1988 Thin liquid films. Marcel Dekker, NY.

Kaštánek F., Zahradník J. a kol. 1988,1993 Chemical reactors for gas-liquid systems. Ellis Horwood UK/Academia Praha.

Kaštánek F. 2001 Bioinženýrství. Academia, Praha.

Kok J.B.W. 1993 Dynamics of a pair of gas bubbles moving through liquid. Eur. J. Mech. B12, Part I.-Theory, pp 515-540, Part II.-Experiment, pp 541-560.

Kumaran V., Koch D.L. 1993 The effect of hydrodynamic interactions on the average properties of a bidisperse suspension of high Reynolds number, low Weber number bubbles. Phys. Fluids 5, 1123-1134.

Lamb H. 1932 Hydrodynamics. Cambridge UP, Cambridge.

Levich V.G. 1962 Physicochemical hydrodynamics. Prentice-Hall.

Longuet-Higgins M.S., Kerman B.R., Lunde K. 1991 The release of air bubbles from an underwater nozzle. J. Fluid Mech. 230, 365-390.

Martien P., Pope S.C., Scott P.L., Shaw R.S. 1985 The chaotic behaviour of the leaky faucet. Phys. Lett. 110A (Nos. 7/8), 399-404.

Nicolaides D. 2001 Mesoscale modelling. Molec. Simul. 26, 51-72.

Oguz H.N., Prosperetti A. 1993 Dynamics of bubble growth and detachment from a needle. *J. Fluid Mech.* 257, 111-145.

Park Y., Tyler A.L., de Nevers N. 1977. The chamber orifice interaction in the formation of bubbles. *Chem. Eng. Sci.* 32, 907-916.

Richardson J.F., Zaki W.N. 1954 Sedimentation and fluidization: Part I. *Trans. Instn. Chem. Engrs.* 32, 35-53.

Ruzicka M.C. 2008 On dimensionless numbers. *Chem. Eng. Res. Des.* 86, 835-868.

Shah Y.T. Gas-liquid-solid reactor design. McGraw-Hill, New York 1979.

Shaw R.S. 1984 The dripping faucet as a model chaotic system. Aerial Press, Santa Cruz, CA.

Tritton D.J., Egdell C. 1993 Chaotic bubbling. *Phys. Fluids A*5, 503-505.

Tsuge H. 1986 Hydrodynamics of bubble formation from submerged orifices. In: Cheremisinoff, N. P. Ed.: *Encyclopedia of fluid mechanics*, Vol. 3. Gulf Publ., Houston. (pp 191-232)

Valentin F.H.H. 1967 Absorption in gas-liquid dispersions: some aspects of bubble technology. E.&F.N. SPON Ltd., London.

Voinov O.V. 2001 Motion stability of a periodic system of bubbles in a liquid. *J. Fluid Mech.* 438, 247-275.

Wallis G.B. 1969 One-dimensional two-phase flow, McGraw-Hill, New York.

Wijngaarden L. van 1976 Hydrodynamic interaction between gas-bubbles in liquid. *Journal of Fluid Mechanics* 77, 27-44.

Wijngaarden L. van 1993 The mean rise velocity of pairwise-interacting bubbles in liquid. *J. Fluid. Mech.* 251, 55-78.

Yuan H, Prosperetti A. 1994 On the in-line motion of two spherical bubbles in a viscous fluid. *J. Fluid Mech.* 278, 325-349.

Zahradnik J., Fialova M., Ruzicka M., Drahos J., Kastanek F., Thomas N.H. 1997 Duality of the gas-liquid flow regimes in bubble column reactors. *Chem. Eng. Sci.* 52, 3811-26.