

**České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní**

**Czech Technical University in Prague
Faculty of Mechanical Engineering**

Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

**Suspendace v míchacích zařízeních – optimalizace
jejich konstrukčního uspořádání**

**Particle Suspension in Mixing Equipment – Design
Optimisation**

Summary

Mixing of suspensions is very important operation in chemical and food industry. It frequently appears at preparation of dispersions, their homogenisation, mass transfer operations between solid particles and liquid that is often accompanied by a chemical or biochemical reaction. Very important parameters for designing of mixing apparatuses for suspensions are the critical (just-suspended) impeller speed and power consumption necessary for off-bottom suspension of solid particles but also often distribution of solid-phase in the agitated apparatus in dependence on impeller speed. These design and process parameters are affected by suspension properties (physical properties of particles and liquid, size and concentration of particles) and geometrical configuration of mixing equipment.

Mixing equipment consisted of cylindrical vessel and centred impeller often occurs in industry. This work deals with effect of following geometrical parameters of this standard mixing equipment on minimizing power consumption for particle suspension:

- vessel of mixing equipment (bottom shape, liquid level)
- baffles in mixing vessel
- type and geometrical parameters of impeller (axial impellers, multi-stage impellers)

Many suspension experiments were used for describing of particle suspension in mixing equipment in wide range of physical properties of suspensions. State of just off-bottom particle suspension was often determined visually on the basis of the particles sediment observation at the vessel bottom by classical Zwietering's concept. Accuracy of visual observation of particle layer sediment on the vessel bottom depends on subjective experience of experimenter. This visual method is very simple but it is often difficult to apply or inapplicable e.g. for badly transparent, non-transparent or highly concentrated suspensions. These disadvantages were to remove by a new application of the electrochemical method for identifying the state of just off-bottom particle suspension.

The suspension efficiency of tested geometrical configuration of mixing equipment was compared by means of the power consumption required for off-bottom suspension or homogenisation of solid particles. This work is written to help designers to choose between alternative equipment arrangements, their energetic optimisation and to calculate the critical (just-suspended) impeller speed and power consumption necessary for off-bottom suspension of solid particles.

Souhrn

Míchání suspenzí je jednou z nejrozšířenějších míchacích operací v chemickém, potravinářském a spotřebním průmyslu. Účelem míchání je příprava směsí požadovaných vlastností, jejich homogenizace a intenzifikace přenosu hmoty často doprovázeného chemickými a biochemickými reakcemi. Pro projektování, konstrukci a provozování zařízení pro míchání suspenzí nebo při jejich rekonstrukcích je nutné znát frekvenci otáčení a příkon míchadla potřebný pro dosažení stavu vzosu pevné fáze resp. vytvoření homogenní suspenze, případně pro popis dějů v míchané vsádce i uspořádání vrstvy sedimentovaných částic na dně nádoby resp. rozhraní mraku suspendovaných částic a čisté kapaliny v závislosti na frekvenci otáčení míchadla. Tyto návrhové a provozní parametry závisí nejen na vlastnostech suspenze (fyzikální vlastnosti pevné fáze a kapaliny, velikost a koncentrace částic), ale i na geometrické konfiguraci míchacího zařízení.

V průmyslu se nejčastěji vyskytují míchací zařízení s válcovou nádobou a s osově umístěným mechanickým rotačním míchadlem, které vytváří v nádobě nucené proudění. Při optimalizaci konstrukce těchto standardních míchacích zařízení z hlediska minimalizace energetických i provozních nákladů na míchání suspenzí byla pozornost věnována zvláště jeho geometrickému uspořádání:

- nádoba míchacího zařízení (tvar dna, plnění)
- narážky v míchané nádobě
- typ a geometrické uspořádání míchadla (axiální míchadla, etážová míchadla)

Suspendace v míchacích zařízeních byla popsána na základě mnoha modelových experimentů v širokém rozsahu fyzikálních vlastností suspenzí. Pro identifikaci průběhu procesu suspendace pevné fáze byla užívána klasická Zwieteringova vizuální metoda, jejíž přesnost je však silně ovlivněna subjektivními zkušenostmi experimentátora a je použitelná pouze pro dobře průhledné suspenze. V případě jemnozrnných a vysoce koncentrovaných suspenzí, u kterých s rostoucí koncentrací a jemností částic klesá i jejich průhlednost, je tato metoda obtížně použitelná nebo dokonce zcela nepoužitelná. Tyto nedostatky lze odstranit aplikací nově navržené elektrodifúzní metody identifikace stavu vzosu pevné fáze.

Suspendační účinnost jednotlivých variant geometrických konfigurací míchacích zařízení byla porovnána na základě příkonu míchadla potřebného pro dosažení požadovaného stavu suspendace. Poznatky o procesu míchání suspenzí uvedené v této práci mohou sloužit jako podklady projektantům a konstruktérům při navrhování a rekonstrukci průmyslových míchacích zařízení pro míchání suspenzí. Zejména pro výpočet základních návrhových parametrů a pro volbu energeticky optimálního uspořádání těchto zařízení.

Klíčová slova: míchání, suspendace, suspenze, vysoce koncentrovaná suspenze, suspendační účinnost, otáčky vzhledu, příkon míchadla, míchací zařízení, nádoba, tvar dna, narážky, axiální míchadlo, etážové míchadlo

Key Words: mixing, particle suspension, suspension, high concentrated suspension, suspension efficiency, just-suspended impeller speed, impeller power consumption, mixing equipment, vessel, bottom shape, baffles, axial impeller, multi-stage impeller

České vysoké učení technické v Praze

Název: Suspendace v míchacích zařízeních – optimalizace jejich
konstrukčního uspořádání

Autor: Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Počet stran: 27

Náklad: 170 výtisků

© Tomáš Jirout, 2007

ISBN

Obsah

1. ÚVOD	6
2. TEORETICKÝ ÚVOD	7
3. POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ METODY	8
4. VLIV USPOŘÁDÁNÍ MÍCHACÍHO ZAŘÍZENÍ NA FREKVENCI OTÁČENÍ A PŘÍKON MÍCHADLA POTŘEBNÝ PRO SUSPENDACI	9
4.1. Nádoba míchacího zařízení	10
4.2. Narážky v míchané nádobě	11
4.3. Typ a geometrické uspořádání míchadla	12
4.3.1. Rychloběžná axiální míchadla	13
4.3.2. Etážová míchadla	19
5. SHRUTÍ ZÁVĚRŮ A DOPORUČENÍ	22
Seznam použitých symbolů a označení	24
Seznam použité literatury	24
Odborný životopis	27

1. ÚVOD

Míchání v kapalném prostředí je velmi častou operací v chemickém, potravinářském a spotřebním průmyslu. Účelem míchání je intenzifikace přenosu tepla a hmoty a příprava směsí požadovaných vlastností, např. suspenzí a emulzí. Jednou z nejrozšířenějších míchacích operací v průmyslu je právě míchání suspenzí [Sei05], které je nejčastěji doprovázeno přenosem hmoty a chemickými reakcemi. Limitním stavem pro projektování a provozování zařízení pro míchání suspenzí je dosažení vzhledu pevné fáze, který se definuje jako stav, kdy jsou všechny pevné částice rozptýleny v míchané kapalině, tzn. žádné částice nezůstávají nehybně ležet na dně nádoby a všechny jsou zcela obtékány kapalinou. Tím je dosaženo maximální mezifázové plochy, což je žádoucí např. při přenosu hmoty. V některých průmyslových procesech je také nutné zajistit dostatečnou homogenitu suspenze, tj. rovnoměrné rozložení koncentrace částic v míchané vsádce.

Pro projektování, konstrukci a provozování zařízení pro míchání suspenzí nebo při jejich rekonstrukcích je nutné znát frekvenci otáčení a příkon míchadla potřebný pro dosažení stavu vzhledu pevné fáze resp. vytvoření homogenní suspenze, případně pro popis dějů v míchané vsádce i uspořádání vrstvy sedimentovaných částic na dně nádoby resp. rozhraní mraku suspendovaných částic a čisté kapaliny v závislosti na frekvenci otáčení míchadla. Tyto návrhové a provozní parametry závisí nejen na vlastnostech suspenze (fyzikální vlastnosti pevné fáze a kapaliny, velikost a koncentrace částic), ale i na geometrické konfiguraci míchacího zařízení (tvar nádoby, typ míchadla a jejich vzájemné geometrické uspořádání). V průmyslu se nejčastěji vyskytují míchací zařízení s válcovou nádobou a s osově umístěným mechanickým rotačním míchadlem, které vytváří v nádobě nucené proudění. Vlivu geometrického uspořádání těchto míchacích zařízení a vlastností míchané suspenze na suspendaci v míchacích zařízeních je věnována pozornost v této práci.

Problematice míchání suspenzí se v minulosti věnovala celá řada autorů. Za průkopnickou práci v této oblasti je považována publikace Zwieteringa [Zwi58], ve které popsal vliv základních geometrických parametrů míchadla a vlastností suspenze na hodnotu frekvence otáčení míchadla potřebnou pro dosažení stavu vzhledu částic. Tyto závěry učinil na základě vizuálního sledování vrstvy částic sedimentovaných na dně nádoby. Na tuto práci navázala celá řada autorů např. Nienow [Nie68], Baldi a kol. [Bal78], Chapman a kol. [Cha83], Myers a kol. [Mye94], Armenante a kol. [Arm98]. Výsledky suspenzačních experimentů mnoha autorů porovnávají a doplňují Kraume a Zehner [Kra88], Rieger a Ditzl [Rie94] a nejnověji i Kasat a Pandit [Kas05].

2. TEORETICKÝ ÚVOD

Pro udržení částic pevné fáze ve vznosu je nutné, aby vertikální složka síly, kterou působí kapalina na částice, byla větší než tíhová síla zmenšená o sílu vztlakovou. V limitním případě platí, že částice nacházející se těsně před vznosem z vrstvy usazených částic (resp. před jejich usazením) na dně a částice nacházející se v úvrati na rozhraní mraku vytvořené suspenze a čisté kapaliny mají nulovou rychlost. Vertikální složka síly, kterou působí kapalina na tyto částice, je pak v rovnováze s tíhovou silou zmenšenou o sílu vztlakovou. Pro geometricky podobná míchací zařízení lze inspekční analýzou [Rie94] rovnice kontinuity a Navier–Stokesových rovnic společně s touto silovou bilancí dojít k závěru, že v turbulentní oblasti je modifikované Froudovo číslo Fr' funkcí bezrozměrné velikosti částic d_p/D a střední objemové koncentrace pevné fáze c_v

$$Fr' = f\left(\frac{d_p}{D}, c_v\right). \quad (1)$$

Závislost modifikovaného Froudova čísla na bezrozměrné velikosti částic a střední objemové koncentraci (1) se nazývá *suspendační charakteristika* a v tomto tvaru lze vyhodnocovat experimentální určování frekvence otáčení míchadla potřebné pro dosažení, resp. udržení vznosu pevné fáze v turbulentní oblasti proudění. Mechanismus suspendace relativně malých částic je odlišný od částic relativně větších. Z tohoto důvodu je nutné odlišit i vyhodnocení experimentálních dat pro tyto dvě oblasti. Rieger a Ditl v [Rie94] ukázali, že suspendační charakteristiky lze pro jednotlivé objemové koncentrace pevné fáze vyjádřit mocninovou závislostí

$$Fr' = C_i \left(\frac{d_p}{D}\right)^{\gamma_i} \quad (2)$$

s koeficienty C_i a γ_i pro relativně malé částice, resp. C_2 a γ_2 pro částice relativně větší.

Koeficienty C_i a γ_i korelace (2) vyjadřující suspendační charakteristiku míchadla závisí na střední objemové koncentraci pevné fáze c_v . Matematický popis této závislosti navrhl a ověřil na experimentálních datech Rieger v [Rie00a a Rie02] ve tvaru

$$C_i = A_i \exp(B_i c_v) \quad (3)$$

a

$$\gamma_i = \alpha_i + \beta_i c_v. \quad (4)$$

V této formě byla vyhodnocena většina dále uváděných suspendačních experimentů. Takto získané bezrozměrné suspendační charakteristiky umožňují

projektantům a konstruktérům v geometricky podobných míchacích zařízeních výpočet frekvence otáčení míchadel potřebné pro dosažení stavu vzosu částic.

Suspendační účinnost míchadel je posuzována na základě bezrozměrného příkonu míchadla potřebného k uvedení částic do vzosu. Pro tento účel navrhl Rieger [Rie93] bezrozměrné kritérium π_s

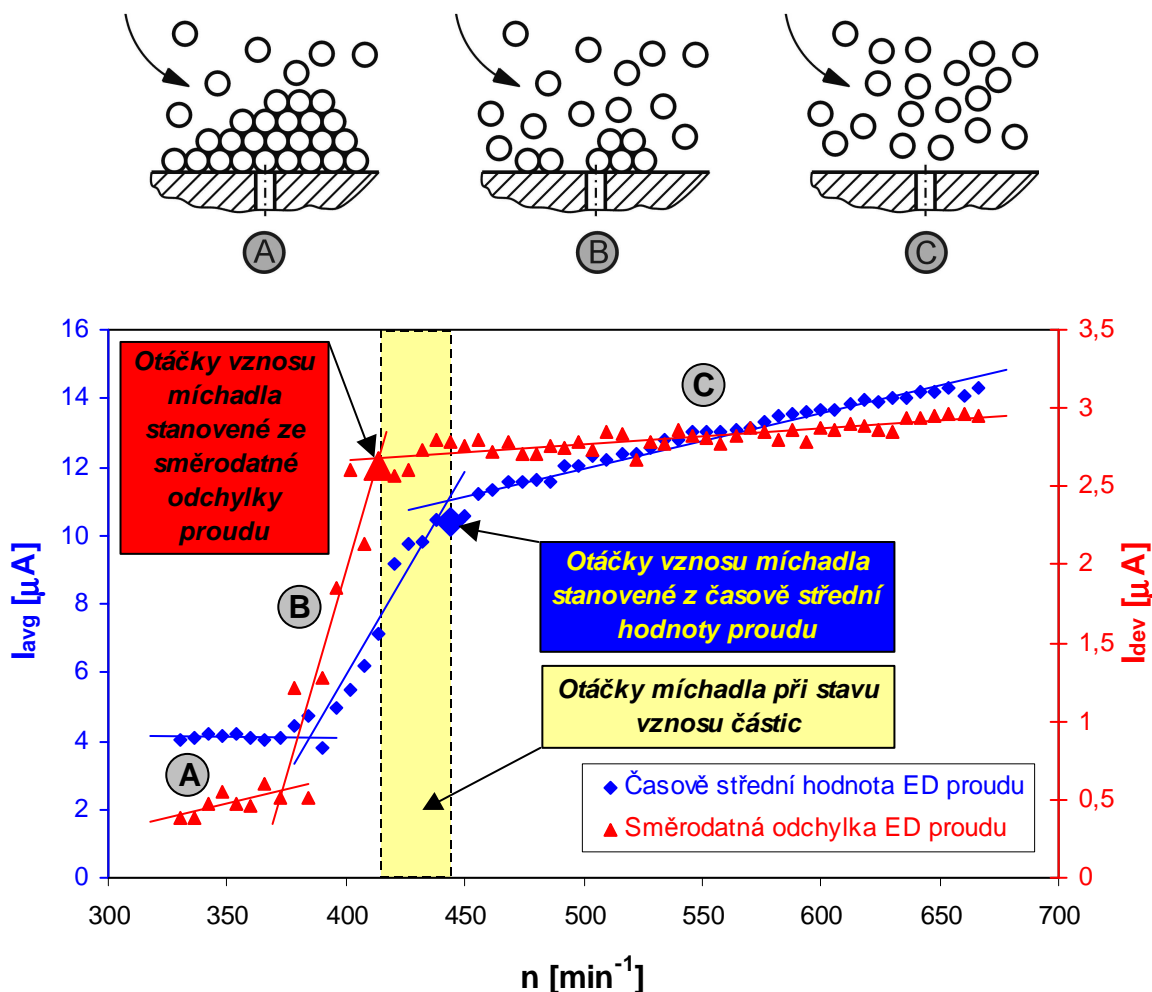
$$\pi_s = \frac{P}{\rho_{su}} \left(\frac{\rho}{g\Delta\rho} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{D} \right)^{\frac{7}{2}} = P_{O} \cdot (Fr')^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{7}{2}}. \quad (5)$$

3. POUŽITÉ EXPERIMENTÁLNÍ METODY

Při suspendačních experimentech se nejčastěji používá pro identifikaci stavu vzosu částic klasická Zwieteringova vizuální metoda [Zwi58], resp. vizuální metoda založená na sledování uspořádání a výšky vrstvy částic usazených na dně nádoby [Rie94]. Nespornou výhodou obou těchto vizuálních metod je jejich jednoduchost a minimální náklady na vlastní měření. Bohužel je jejich přesnost silně ovlivněna subjektivními zkušenostmi experimentátora při identifikaci stavu vzosu. Další nevýhodou těchto metod, plynoucí ze zkušeností získaných při suspendačních experimentech prováděných v širokém rozsahu vlastností suspenzí, je jejich omezenost pouze na dobře průhledné suspenze. V případě jemnozrnných a vysoce koncentrovaných suspenzí, u kterých s rostoucí koncentrací a jemností částic klesá i jejich průhlednost, jsou tyto metody obtížně použitelné nebo dokonce zcela nepoužitelné.

Tyto nedostatky subjektivních vizuálních metod lze odstranit nově navrženou aplikací elektrodifúzní diagnostiky na sledování vrstvy částic sedimentovaných na dně nádoby a tím identifikovat stav vzosu pevné fáze v okolí elektrodifúzní (ED) sondy. Tato metoda je založena na měření difúzního elektrického proudu procházejícího z pracovní (měřicí) sondy zabudované do dna nádoby přes elektrolyt na sběrnou (pomocnou) elektrodu. Velikost tohoto proudu je ovlivněna rychlostí proudění suspenze, resp. přítomností vrstvy usazených částic. S postupným zvyšováním frekvence otáčení míchadla dochází k odkrývání elektrodifúzní sondy a to od stavu, kdy je ED sonda zakryta nehybnou vrstvou usazených částic (A) přes postupné odkrývání vrstvy částic (B) až po stav, kdy je ED sonda již plně obtékána proudící suspenzí a nenachází se na ní žádné usazené částice (C). Tento proces suspendace je doprovázen zvyšováním časově střední hodnoty a směrodatné odchylky měřeného elektrického proudu s rostoucí hodnotou frekvence otáčení míchadla. Stav vzosu částic v místě ED sondy je pak v této závislosti reprezentován skokovým nárůstem střední hodnoty i směrodatné odchylky elektrického proudu procházejícího sledovanou sondou tak, jak je znázorněno na obr. 1.

Elektrodifúzní metodu identifikace stavu vzhosu pevné fáze jsem podrobně popsal např. v [Jir05 a Jir06a].



Obr. 1. Metodika vyhodnocení frekvence otáčení míchadla potřebné k uvedení částic na sledované ED sondě do vzhosu a ukázka závislosti časově střední hodnoty (avg) a směrodatné odchylky (dev) elektrodifúzního proudu na frekvenci otáčení míchadla.

4. VLIV USPOŘÁDÁNÍ MÍCHACÍHO ZAŘÍZENÍ NA FREKVENCI OTÁČENÍ A PŘÍKON MÍCHADLA POTŘEBNÝ PRO SUSPENDACI

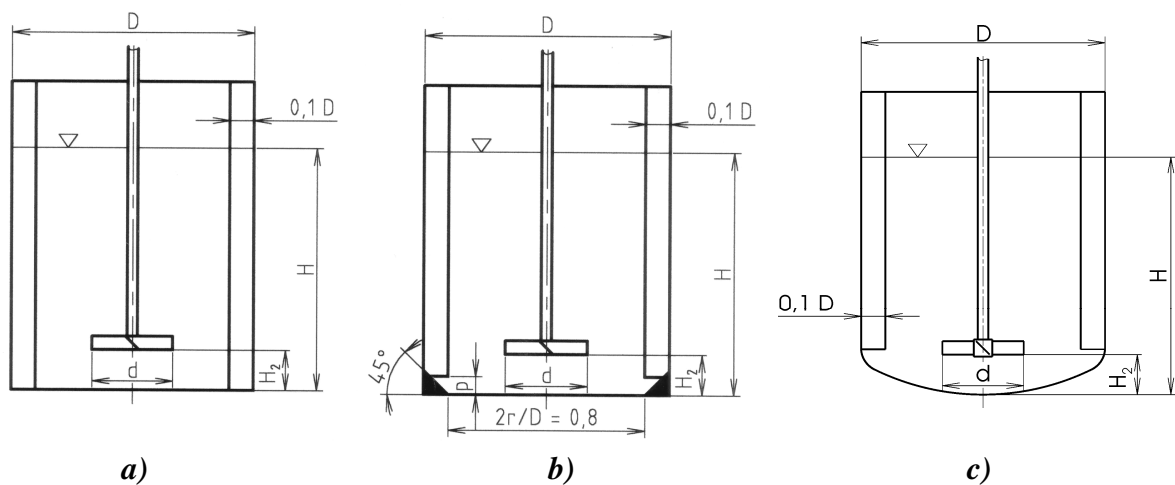
Při optimalizaci konstrukce standardních míchacích zařízení z hlediska minimalizace energetických i provozních nákladů na míchání suspenzí je třeba věnovat pozornost zvláště jeho geometrickému uspořádání, které ovlivňuje proudění a procesy probíhající v míchané vsádce. Pro konstrukční návrh míchacího ústrojí (volba a pevnostní dimenzování pohonu míchadla) je nutné znát velikost frekvence otáčení a příkonu míchadla. Hodnota frekvence otáčení míchadla potřebná pro dosažení stavu vzhosu se stanovuje v závislosti na

vlastnostech suspenze a geometrické konfiguraci míchacího zařízení experimentálně výše uvedenými metodami. Porovnání suspenzační účinnosti jednotlivých variant geometrických konfigurací míchacích zařízení je možné na základě příkonu míchadla potřebného pro dosažení požadovaného stavu suspenzace. Příkon míchadla je stanovován buď přímo měřením jeho hodnoty při suspenzačních experimentech, nebo z příkonové charakteristiky míchadla za předpokladu míchání homogenní suspenze.

4.1. Nádoba míchacího zařízení

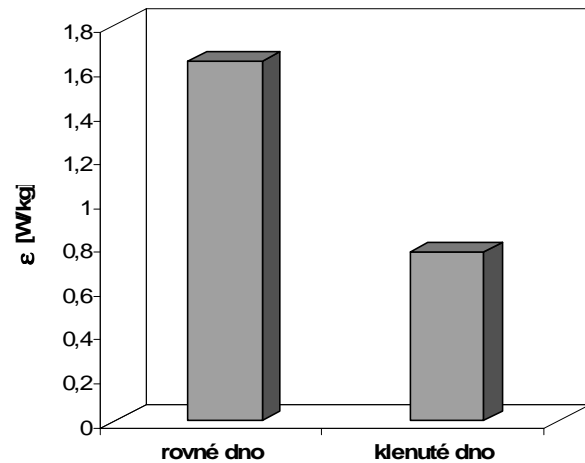
Nejčastěji se v průmyslu vyskytují míchací zařízení s válcovou nádobou a s osově umístěným mechanickým rotačním míchadlem. V případě aparátů zatížených pouze hydrostatickým tlakem míchané vsádky se používají velké válcové nádoby s rovným dnem, případně menší nádoby s dnem kuželovým opatřeným výpustním hrdlem. Tlakové aparáty jsou zpravidla vždy z pevnostního hlediska tvořeny válcovou nádobou s klenutým dnem.

Vzhledem k výrobní jednoduchosti je převážná část experimentálních prací věnovaných míchání suspenzí prováděna ve válcových nádobách s rovným dnem, jejichž souhrnný přehled uvádí např. Rieger a Ditl [Rie94] a nejnověji i Kasat a Pandit [Kas05]. Z výsledků experimentálního sledování průběhu suspenzace v nádobě s rovným dnem plyne, že její největší nedostatek spočívá v ostrém přechodu mezi rovným dnem a pláštěm nádoby, ve kterém klesá intenzita míchání a zdržují se usazené částice, což má za následek výrazný nárůst hodnot otáček vznosu a tím i příkonu potřebného k dosažení stavu vznosu. Tento nedostatek lze odstranit konstrukční úpravou dna nádoby navrženou Chudackem [Chu85, Chu86] spočívající v odstranění ostrého přechodu mezi dnem a pláštěm nádoby, např. kuželovým přechodem znázorněným na obr. 2 a v úpravě prostoru dna pod míchadlem.



Obr. 2. Válcová nádoba s rovným dnem (a), s kuželovým přechodem mezi rovným dnem a pláštěm nádoby (b) a s klenutým dnem (c) [Jir99].

Porovnání energetické náročnosti suspendace ve válcové nádobě s rovným dnem (obr. 2a), s kuželovým přechodem mezi rovným dnem a pláštěm nádoby (obr. 2b) a v průmyslových aplikacích často se vyskytující válcové nádoby s klenutým dnem (obr. 2c) jsem publikoval ve studii [Jir99]. Kuželový přechod sice značně snížil frekvenci otáčení i příkon míchadla potřebný k uvedení částic do vzhledu oproti nádobě s rovným dnem, avšak pro dosažení stavu vzhledu je energeticky nejvýhodnější nádoba s klenutým dnem, a to v širokém rozsahu velikostí a koncentrací částic v suspenzi. Použití elektrodifúzní metody identifikace stavu vzhledu pevné fáze umožnilo tyto experimenty rozšířit i pro vysoce koncentrované suspenze. Měrný příkon potřebný pro dosažení stavu vzhledu může být při míchání suspenzí v nádobě s klenutým dnem až poloviční oproti použití dna rovného, což ilustruje porovnání znázorněné na obr. 3.



Obr. 3. Měrný příkon potřebný pro suspendaci v nádobě s rovným a klenutým dnem ($d_p = 0,25 \text{ mm}$; $c_v = 40 \%$).

V průmyslových aplikacích se často vyskytují míchací zařízení odlišující se od standardního uspořádání pouze výškou hladiny v nádobě, která se může měnit v závislosti na stupni plnění aparátu nebo kolísat v průběhu jeho napouštění a vypouštění. Z tohoto důvodu je nutné zabývat se i vlivem výšky hladiny na frekvenci otáčení míchadla potřebnou k dosažení vzhledu částic a zohlednit tento parametr tak, aby bylo možné použít experimentální výsledky pro míchací zařízení se standardní geometrií i pro návrh průmyslových zařízení odlišujících se právě výškou hladiny. Z výsledků experimentálního sledování vlivu výšky hladiny na suspendaci ve válcové nádobě s rovným dnem, které jsem publikoval v [Jir01] plyne, že kolísání hladiny kapaliny v rozsahu od 0,75 do 2-násobku průměru nádoby prakticky neovlivňuje okamžik vzhledu pevné fáze, avšak ovlivňuje homogenitu suspenze.

4.2. Narážky v míchané nádobě

Při míchání ve válcových nádobách s rovným i klenutým dnem má na suspendaci částic vliv i tvar a poloha narážek v nádobě. Nádoba standardního míchacího zařízení je zpravidla vybavena čtyřmi rovnými radiálními narážkami pro potlačení tangenciálního proudění a tvorby středového víru (viz obr. 2). Narážky jsou zpravidla připevněny ke stěně nádoby, sahají ode dna až nad hladinu vsádky a jejich šířka je rovna 1/10 až 1/8 vnitřního průměru nádoby. Výhodou tohoto provedení narážek je nesporně jejich konstrukční jednoduchost,

tuhost a stabilita nejen jich samotných, ale i pláště nádoby. Standardní radiální narážky jsou v průmyslových aplikacích široce rozšířeny, a proto jsou využívány i při většině suspenčních experimentů, což dává dostatek podkladů pro navrhování těmito narážkami vybavených míchacích zařízení. Nevýhodou tohoto uspořádání bývá zachycování částic za narážkami, kde klesá intenzita proudění. Tento nedostatek je možné odstranit mezerou mezi stěnou a narážkou dovolující částečný průtok suspenze, nebo použitím profilovaných (šípových) narážek navržených Medkem a Seichterem [Med01]. Špidla a kol. [Špi03, Špi05] použil tento typ narážek při systematických experimentech ve válcové nádobě s rovným dnem velikosti poloprovozního měřítka. Pro standardní typy axiálních míchadel byla pozorována energetická úspora při užití nádoby se šípovými narážkami, avšak pro hydrodynamicky optimalizovaná míchadla tento efekt nebyl již tak výrazný.

Mimo již zmíněného tvaru ovlivňuje průběh suspendace i poloha narážek v nádobě. Vlivem vzdálenosti spodní hrany narážek ode dna nádoby se zabývali Myers a Fasano [Mye92]. V jejich práci byla vzdálenost narážek ode dna měněna v rozsahu od nuly do vzdálenosti rovnající se šířce narážek. Vlivu tohoto parametru je věnována i práce, kterou jsme publikovali v [Jir00], avšak v mnohem širším rozsahu vzdáleností narážek ode dna, a to pro axiální i radiální míchadla. Pro míchadla se skloněnými lopatkami mělo pozitivní efekt na suspendaci zvětšení vzdálenosti narážek ode dna v rozsahu od jedné čtvrtiny do poloviny šířky narážek. Pro hydrodynamicky optimalizovaná míchadla bylo zvětšení vzdálenosti narážek ode dna v rozsahu od nuly do poloviny šířky narážek prakticky bez efektu. Zvýšení vzdálenosti spodní hrany narážek nade dnem do vzdálenosti rovnající se šířce narážek a vyšší mělo pro proměřovaná axiální míchadla spíše škodlivý efekt na proces suspendace.

Díky eliminaci mrtvých zón proudění jsou všechny výše uvedené úpravy standardních narážek výhodné nejenom z hlediska suspendace, ale i z provozních a technologických důvodů (např. jednotná kvalita produktu, dobrá čistitelnost a sanitace aparátu).

4.3. Typ a geometrické uspořádání míchadla

Volba typu a geometrického uspořádání rotačního míchadla ovlivňuje nejen průběh suspendace částic, ale hlavně i energii potřebnou na suspendaci pevné fáze. Pro míchání suspenzí se nejčastěji používají rychloběžná míchadla vyvolávající v nádobě převážně axiální proudění vsádky. Charakter míchadlem vyvolaného proudění ve válcové nádobě s radiálními narážkami je dán především tvarem jeho lopatek. V současné době je pro suspendaci užíváno mnoho typů míchadel lišících se nejenom tvarem, ale i počtem lopatek. Základní typy těchto míchadel jsou standardizovány, avšak výrobci míchacích zařízení často používají i vlastní nově vyvinuté typy hydrodynamicky optimalizovaných míchadel chráněných patentovým právem. Hodnota frekvence otáčení i příkon míchadla potřebný pro suspendaci přitom závisí na poměru průměru míchadla

k průměru nádoby a výšce míchadla nade dnem nádoby. Z hlediska konstrukce vlastního míchadla jsou jeho suspenzační účinky ovlivněny zejména tvarem a počtem jeho lopatek.

4.3.1. Rychloběžná axiální míchadla

V literatuře tak, jak již bylo uvedeno, existuje mnoho výsledků experimentálního sledování průběhu suspendace s axiálním míchadlem, avšak většinou pouze v nádobě s rovným dnem. Např. Rieger a Ditzl [Rie94] uvádějí experimentální výsledky měření frekvence otáčení míchadla pro uvedení částic do vznosu v širokém rozsahu fyzikálně-chemických vlastností pevné fáze. Výsledky jsou vyhodnoceny ve formě navržených bezrozměrných suspenzačních charakteristik. Byly proměřeny suspenzační účinky šestilopátkového míchadla s lopatkami skloněnými pod úhlem 45° ve standardní válcové nádobě s rovným dnem. Na tuto práci navázal Rieger [Rie00a] a rozšířil získané výsledky ještě o vliv objemové koncentrace částic v rozsahu $2,5 \div 40$ obj. % a navrhl výpočetní korelace suspenzačních charakteristik pro výpočet otáček vznosu v širokém rozsahu fyzikálně-chemických vlastností suspenze. Sledováním vlivu výše uvedených geometrických parametrů na frekvenci otáčení a příkon potřebný pro uvedení částic do vznosu v poloprovozní válcové nádobě s rovným dnem o průměru 1 m se zabývali také Sinevič a kol., např. v [Sin99, Špi02a, Špi02b]. Dále tyto autoři věnovali pozornost porovnání dat získaných z modelových a poloprovozních experimentů. Další z řady autorů zabývajících se vlivem geometrických parametrů na suspenzační účinky míchadel je Wu a kol. [Wu01a, Wu01b]. Tito autoři proměřili celou řadu axiálních i radiálních míchadel, a to nejenom jejich suspenzační účinky, ale i jejich čerpací účinky a byla ukázána souvislost mezi čerpacími účinky míchadla a hodnotou frekvence otáčení míchadla při stavu vznosu pevné fáze v širokém rozsahu velikostí a koncentrací pevné fáze. V práci [Wu01a] byl také sledován vliv reologického chování kapalné fáze suspenze na otáčky vznosu částic. Wu a kol. [Wu02] dále rozšířili výše uvedené experimenty i pro vysoce koncentrované suspenze (až 52 obj. %).

Experimentálních výsledků v oblasti míchání suspenzí v nádobách s klenutým dnem není v literatuře tolik jako pro nádoby s dnem rovným a už vůbec ne v tak širokém rozsahu geometrických konfigurací i fyzikálních vlastností suspenzí. Míchání v nádobách s klenutým dnem je věnována publikace např. autorů Liepe a kol. [Lie98]. V kapitole této knihy věnované míchání suspenzí je uveden vliv celé řady geometrických parametrů na frekvenci otáčení míchadla a příkon potřebný k uvedení částic do vznosu, ale již ne v tak širokém rozsahu fyzikálních vlastností suspenzí, geometrií a typů míchadel, aby tyto podklady mohly sloužit pro výpočet frekvence otáčení a příkonu míchadla při navrhování míchacích zařízení pro míchání suspenzí. Obdobné výsledky publikoval např. Kraume a Zehner [Kra88]. Korelaci, která umožňuje výpočet otáček vznosu v širokém rozsahu velikostí a koncentrací

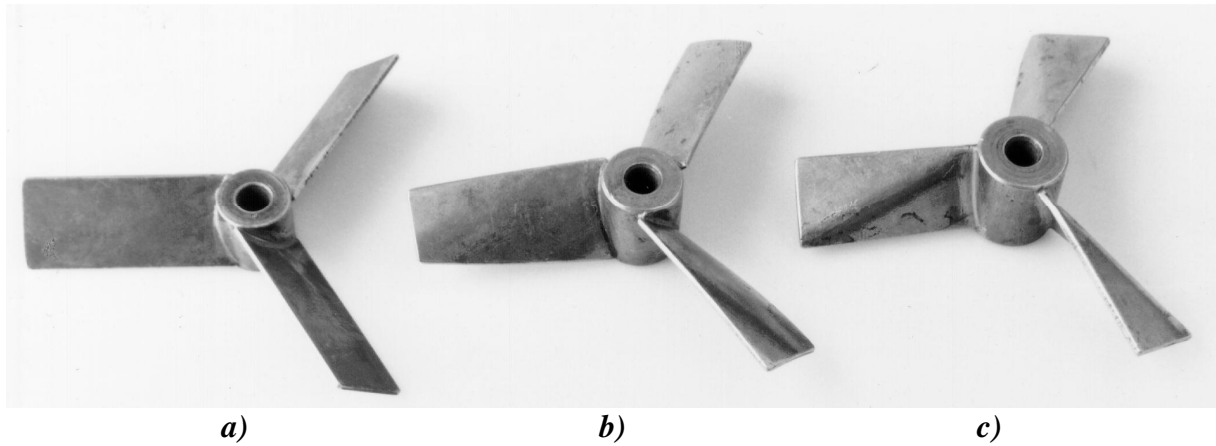
částic, navrhl na základě mnoha experimentů Rieger [Rie02], avšak pouze pro standardní šestilopátkové míchadlo v nádobě s klenutým dnem.

Na základě mnoha experimentálních prací citovaných v celé této kapitole lze shrnout, že z hlediska příkonu míchadla potřebného pro dosažení stavu vznosu je optimální výška spodní hrany lopatek standardních axiálních míchadel nade dnem nádoby v rozmezí od jedné třetiny až do poloviny průměru míchadla $H_2/d = 1/3 \div 1/2$ a optimální poměr průměru nádoby k průměru míchadla se pohybuje kolem hodnoty $D/d = 3$. Tento závěr potvrzují i publikace Riegra a Ditla [Rie00b, a Dit06] shrnující vliv jednotlivých geometrických parametrů, avšak opět v poměrně omezeném rozsahu vlastností suspenze.

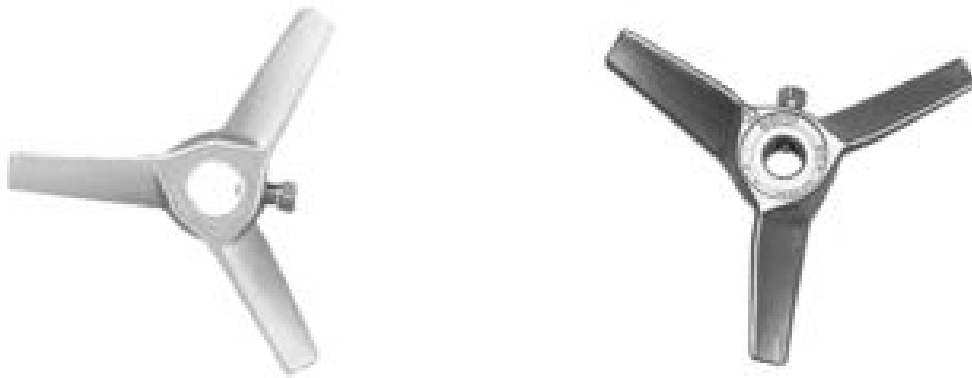
Z publikací citovaných v této kapitole je zřejmé, že v literatuře prakticky neexistují ucelené souhrny suspenzačních experimentů v nádobách s klenutým dnem, které by dávaly dostatečné podklady projektantům a konstruktérům pro návrh, optimalizaci a provozování těchto míchacích zařízení, i když jsou tato zařízení v průmyslových aplikacích značně rozšířená a navíc mají výrazně nižší energetické nároky na suspenzaci než zařízení s rovným dnem. Proto byly cílem dalšího výzkumu systematické experimenty zaměřené na vliv typu a geometrie axiálních míchadel na suspenzaci ve válcové nádobě s klenutým dnem. Bylo proměřeno jedenáct typů a geometrií axiálních míchadel v širokém rozsahu fyzikálních vlastností míchaných suspenzí:

- třílopatková míchadla s různým úhlem sklonu lopatek ($\alpha = 24^\circ, 35^\circ$ a 45°) (obr. 4a, 6c)
- šestilopátkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ dle CVS 69 1020 (obr. 12a)
- míchadla s rovnými lomenými lopatkami s různým počtem lopatek ($i_L = 3, 4$ a 6), tvar lopatek míchadla dle CVS 69 1043 ($s/d = 1,5$) (obr. 4c, 8)
- třílopatkové míchadlo s tvarovanými lopatkami dle CVS 69 1042.2 (obr. 4b)
- axiální míchadlo firmy LIGHTNIN typ A310 (obr. 5)
- vrtulové míchadlo – Marine propeller firmy EKATO (obr. 6a)
- vrtulové míchadlo navržené na pracovišti Anhalt University of Applied Sciences / Hochschule Anhalt (FH) (obr. 6b)

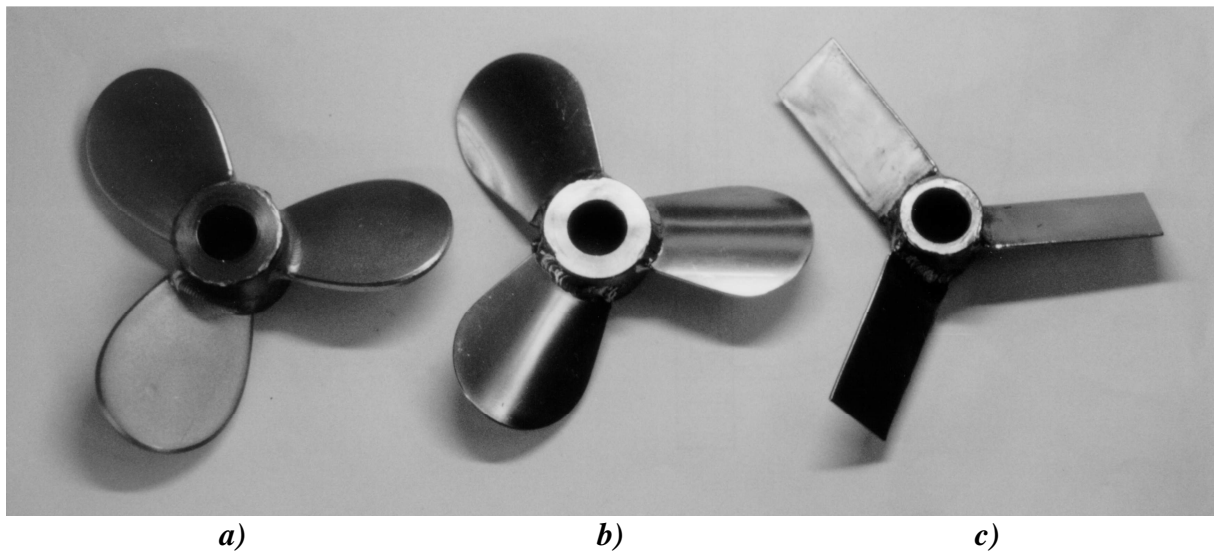
Geometrické uspořádání míchacího zařízení, s ohledem na minimální příkon míchadla potřebný pro suspenzaci částic, bylo zvoleno pro standardní typy axiálních míchadel v souladu se závěry uvedenými ve výše zmíněných publikacích, resp. pro hydrodynamicky optimalizovaná míchadla bylo stanovení energeticky optimální konfigurace součástí prováděných experimentů. Přehled celého rozsahu experimentů je uveden v tab. 1.



Obr. 4. Třílopatková axiální míchadla dle českých oborových norem: **a)** – třílopatkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ dle CVS 69 1025.3, **b)** – třílopatkové míchadlo s tvarovanými lopatkami dle CVS 69 1042.2, **c)** – třílopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami dle CVS 69 1043 ($s/d = 1,5$).



Obr. 5. Axiální míchadlo firmy LIGHTNIN typ A310.



Obr. 6. Porovnání tvaru lopatek vrtulových míchadel a standardního míchadla: **a)** – vrtulové míchadlo – Marine propeller firmy EKATO, **b)** – vrtulové míchadlo – Anhalt University of Applied Sciences / Hochschule Anhalt (FH), **c)** – třílopatkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ dle CVS 69 1025.3.

<i>Míchadlo</i>	i_L	α	β	γ	D [mm]	D/d	H_2/d	d_p [mm]	c_v
3SL24	3	24°	-	-	200 + 300	3	0,5	0,15 + 3,79	2,5 % + 15 %
3SL35		35°	-	-	200 + 300	3	0,5	0,15 + 3,79	2,5 % + 15 %
3SL45		45°	-	-	200 + 300	3	0,5	0,15 + 3,79	2,5 % + 15 %
6SL45	6		-	-	200 + 400	3	0,5	0,1 + 1,5	2,5 % + 40 %
3RLL	3	67°	25°	48°	200 + 300	3	0,5	0,15 + 3,79	2,5 % + 15 %
4RLL	4				200 + 300	3	0,5	0,15 + 3,79	2,5 % + 15 %
6RLL	6				200 + 300	3	0,5	0,15 + 3,79	2,5 % + 15 %
3TL	3	-	-	-	200 + 300 (P ₀)	3	0,5	0,15 + 3,97	2,5 % + 15 %
A310		-	-	-	300	3	0,5	0,15 + 0,93	2,5 % + 15 %
MP (EKATO)		-	-	-	385	2,67	0,5 + 0,75	0,1 + 1,0	2,5 % + 15 %
P (FH)		-	-	-	385	2,67	0,5 + 0,75	0,1 + 1,0	2,5 % + 15 %

3SL24 – třílopatkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 24^\circ$

3SL35 – třílopatkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 35^\circ$

3SL45 – třílopatkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ dle CVS 69 1025.3

6SL45 – šestilopátkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ dle CVS 69 1020

3RLL – třílopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami dle CVS 69 1043 ($s/d = 1,5$)

4RLL – čtyřlopatkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami dle CVS 69 1043 ($s/d = 1,5$)

6RLL – šestilopátkové míchadlo s rovnými lomenými lopatkami dle CVS 69 1043 ($s/d = 1,5$)

3TL – třílopatkové míchadlo s tvarovanými lopatkami dle CVS 69 1042.2

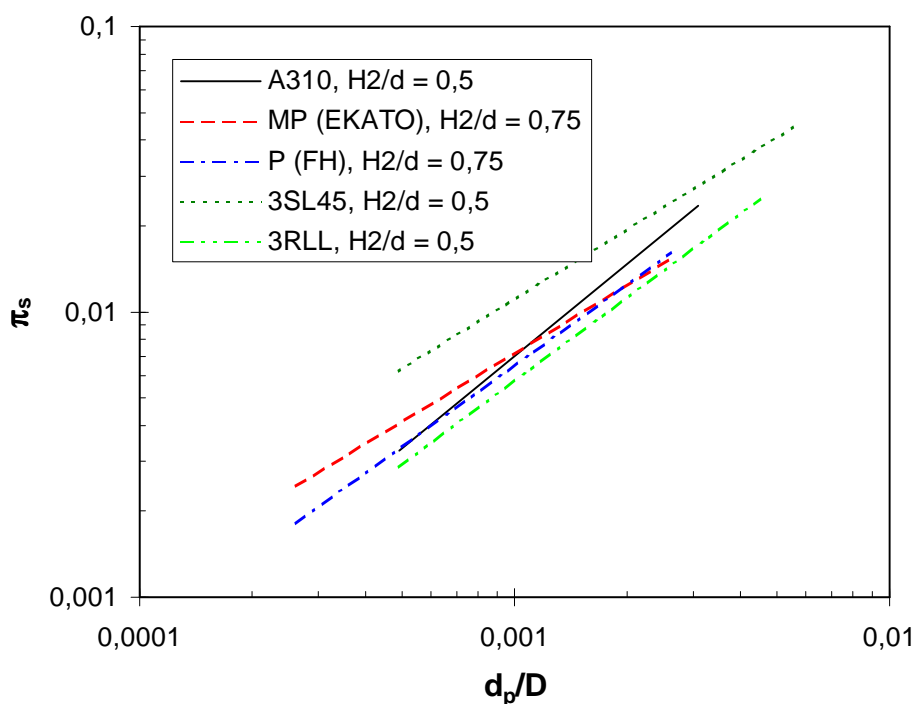
A310 – axiální míchadlo firmy LIGHTNIN typ A310

MP(EKATO) – vrtulové míchadlo – Marine propeller firmy EKATO

P(FH) – vrtulové míchadlo – Anhalt University of Applied Sciences / Hochschule Anhalt (FH)

Výsledky těchto experimentů byly vyhodnoceny ve tvaru bezrozměrných suspenčních a příkonových charakteristik rov. (1) – (5), jejichž koeficienty jsou pro proměřované konfigurace uvedeny v souhrnné publikaci [Jir06b]. Tyto navržené korelace umožňují projektantům a konstruktérům v geometricky podobných míchacích zařízeních výpočet frekvence otáčení a příkonu na hřídeli míchadla potřebných pro dosažení vzhosu částic pro jednotlivé typy míchadel v širokém rozsahu velikostí a koncentrací částic v míchané suspenzi.

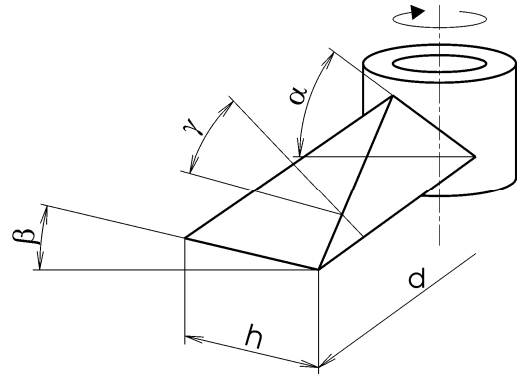
Suspenční účinky hydrodynamicky optimalizovaných míchadel firem zabývajících se projektováním, konstrukcí a stavbou průmyslových míchacích zařízení byly porovnány se základním typem míchadla s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ a s míchadlem s rovnými lomenými lopatkami, které vykazuje nejnižší energetické nároky na suspenzi z porovnávaných axiálních míchadel dle českých oborových norem.



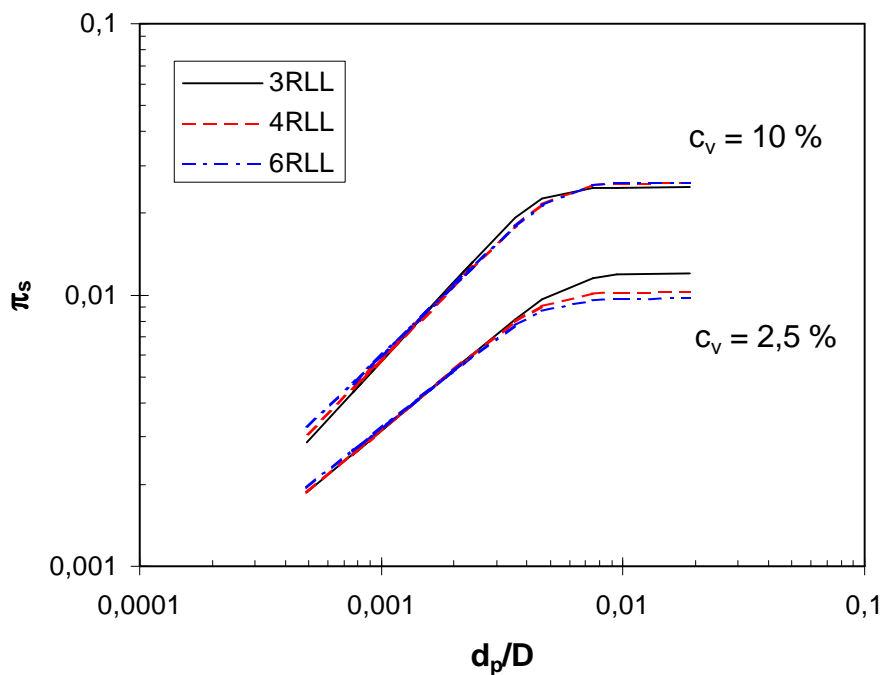
Obr. 7. Závislost bezrozměrného příkonu potřebného k uvedení částic do vzhosu porovnávaných axiálních míchadel na bezrozměrném průměru částic d_p/D pro střední objemovou koncentraci pevné fáze $c_v = 10\%$.

Porovnání suspenční účinnosti axiálních míchadel pro jejich energeticky nejvýhodnější výšky nade dnem je pro střední objemovou koncentraci pevné fáze $c_v = 10\%$ znázorněno na obr. 7. Z tohoto závěrečného srovnání plyne, že všechna hydrodynamicky optimalizovaná míchadla mají výrazně menší energetické nároky na suspenzi než standardní třílopatkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 45^\circ$. Všechna hydrodynamicky

optimalizovaná míchadla vykazují prakticky stejnou suspenzační účinnost, jsou-li porovnávána pro jejich energeticky optimální výšku nade dnem. Míchadlo s rovnými lomenými lopatkami, mající výrazně jednodušší geometrický tvar lopatek dle CVS 69 1043, má prakticky stejné, případně i mírně nižší, energetické nároky na suspenzaci jako proměřovaná zahraniční hydrodynamicky optimalizovaná míchadla. Jejich nesmírnou výhodou je jejich geometricky i výrobně velice jednoduchý tvar lopatek. Z těchto důvodů byla věnována pozornost vlivu počtu lopatek na suspenzační účinky tohoto typu míchadla. Byly proměřeny suspenzační účinky míchadla se třemi, čtyřmi a šesti rovnými lomenými lopatkami, jejichž tvar je znázorněn na obr. 8.



Obr. 8. Tvar lopatek míchadla s rovnými lomenými lopatkami dle CVS 69 1043 ($s/d = 1,5 \Rightarrow \alpha = 67^\circ$; $\beta = 25^\circ$; $\gamma = 48^\circ$; $h/d = 0,2$).



Obr. 9. Závislost bezrozměrného příkonu potřebného k uvedení částic do vnosu míchadel se třemi (3RLL), čtyřmi (4RLL) a šesti (6RLL) rovnými lomenými lopatkami na bezrozměrném průměru částic d_p/D .

Ze srovnání suspenzační účinnosti míchadla s rovnými lomenými lopatkami s různým počtem lopatek pomocí bezrozměrného kritéria π_s rov. (5), vyjadřujícího bezrozměrný příkon míchadla potřebný k uvedení částic do

vznosu (obr. 9), je zřejmé, že v širokém rozsahu vlastností suspenze prakticky nezávisí příkon potřebný pro suspenzaci na počtu lopatek tohoto typu míchadla. Z konstrukčního hlediska je tedy výhodnější užívat míchadla s menším počtem lopatek a to nejenom z důvodu jednodušší výroby míchadla, ale i proto, že tato míchadla potřebují pro uvedení částic do vznosu vyšší otáčky, z čehož plyne menší přenášený kroutící moment a také menší potřebný převodový poměr.

4.3.2. Etážová míchadla

Častou aplikací míchacích operací v průmyslu je míchání suspenzí s vysokým podílem pevné fáze v kapalině. V míchacích zařízeních pro míchání koncentrovaných suspenzí je často nutné zajistit mimo dosažení vlastního vznosu částic suspenze i dostatečnou homogenitu suspenze v míchané vsádce, čehož lze dosáhnout užitím etážových axiálních míchadel.

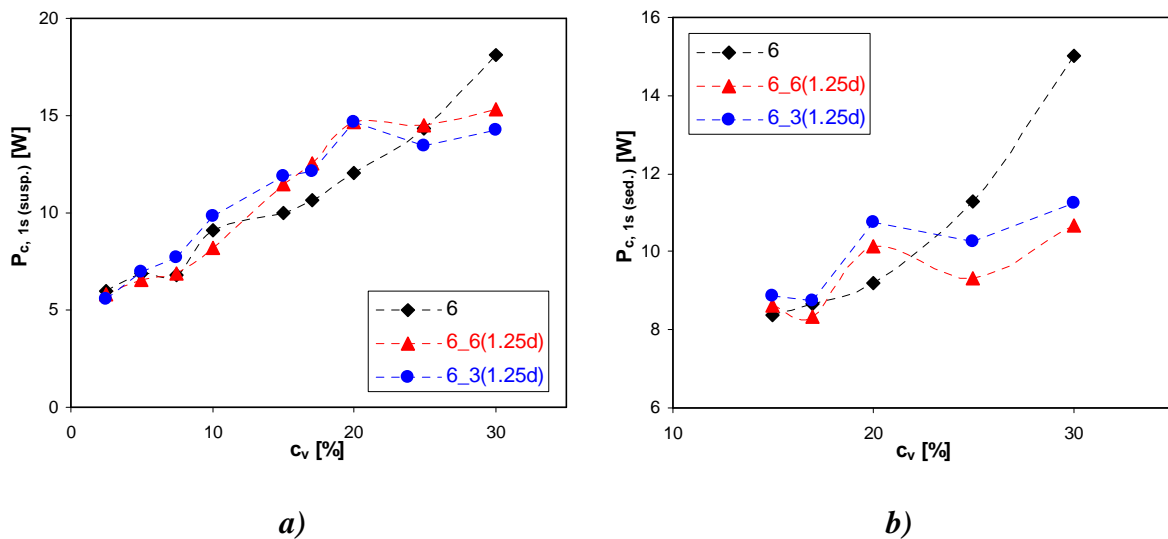
Cílem dalšího výzkumu bylo popsat průběh suspenzace v míchané vsádce míchacího zařízení s etážovými míchadly tvořenými tří (3SL) a šestilopátkovými (6SL) míchadly se skloněnými lopatkami pod úhlem 45° (viz obr. 12a,b; tab. 2) a zejména porovnat suspenzační účinky těchto etážových míchadel s jedním standardním šestilopátkovým míchadlem s lopatkami skloněnými pod úhlem 45° v širokém rozsahu velikostí i koncentrací částic v suspenzi. Sledovaná geometrická uspořádání axiálních míchadel byla vzájemně porovnána i z hlediska příkonu potřebného k uvedení částic do vznosu a vytvoření homogenní suspenze v míchané vsádce. Výsledky těchto experimentů jsem shrnul v publikaci [Jir06c].

Tabulka 2. Geometrické parametry proměřovaných konfigurací míchadel.

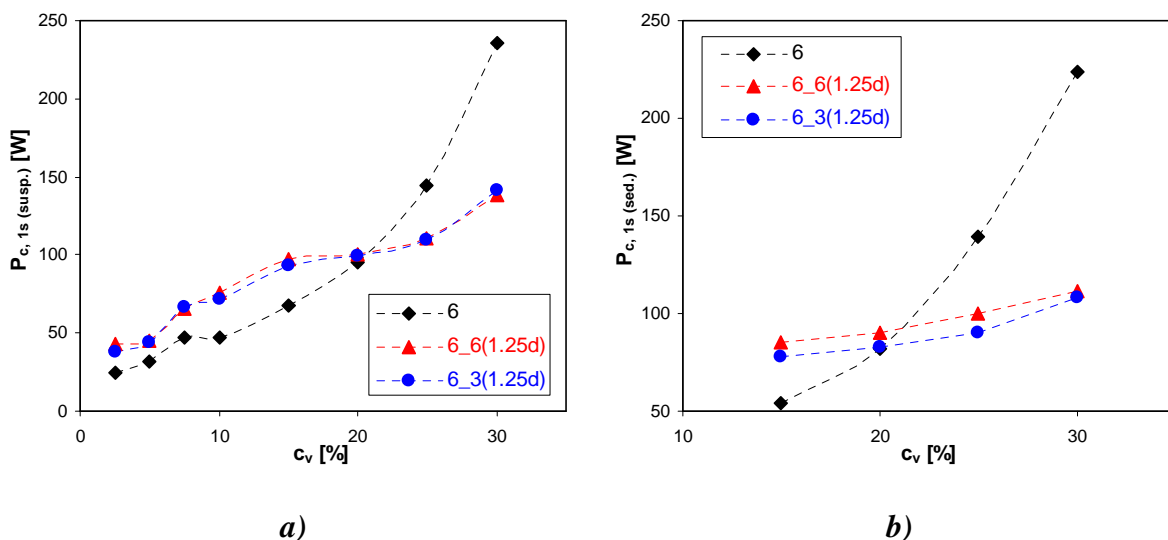
Označení konfigurace	Spodní míchadlo	Horní míchadlo	d/D	H ₂ /d	H ₃ /d
6		–			–
6_6 (0.75d)	6SL	6SL	0,36	0,5	0,75
6_6 (1d)		6SL			1
6_6 (1.25d)		6SL			1,25
6_3 (0.75d)		3SL			0,75
6_3 (1d)		3SL			1
6_3 (1.25d)		3SL			1,25

Nejprve byly vzájemně porovnány jednotlivé konfigurace etážových míchadel. Z hlediska příkonu etážových míchadel potřebného pro dosažení stavu vznosu částic, resp. potřebného pro udržení částic ve vznosu se jeví v celém proměřovaném rozsahu velikostí a koncentrací částic v suspenzi jako nejvýhodnější etážová míchadla s největší vzájemnou vzdáleností míchadel tj. $H_3/d = 1,25$. Zároveň příkon těchto etážových míchadel prakticky nezávisí na počtu jejich lopatek (viz obr. 10 a 11).

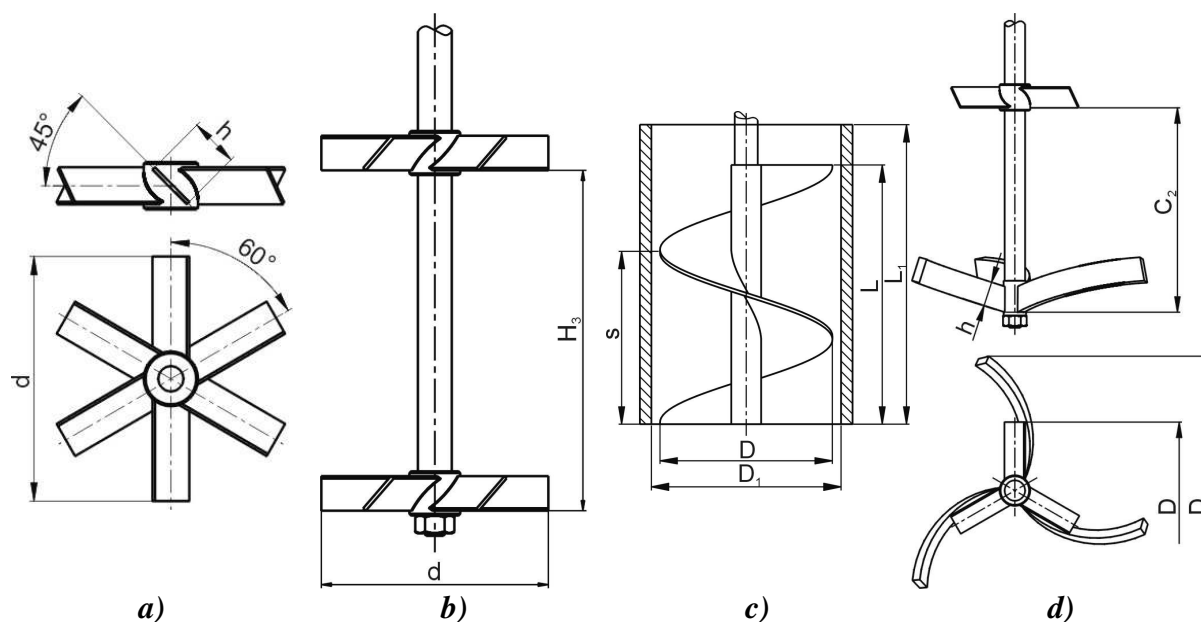
Příkon potřebný pro dosažení, resp. udržení stavu vznosu částic v suspenzi samostatného standardního šestilopátkového míchadla je pro menší částice o koncentraci do $c_v = 25\%$ prakticky stejný jako pro míchadla etážová (viz obr. 10). Pro nejvyšší koncentrace jemných částic začínají být etážová míchadla energeticky výhodnější než míchadlo samostatné. S rostoucí velikostí částic se snižuje koncentrace částic (až na $c_v = 20\%$ pro $d_p = 1\text{ mm}$), od které vykazují etážová míchadla výrazně nižší příkon potřebný pro suspenzi než samostatné šestilopátkové míchadlo, avšak pro nižší koncentrace větších částic je energeticky výhodnější samostatně pracující šestilopátkové míchadlo, což je patrné z porovnání na obr. 11.



Obr. 10. Porovnání příkonu míchadel **a)** potřebného pro dosažení stavu vznosu resp. **b)** potřebného pro udržení částic ve vznosu pro střední objemový průměr částic $d_p = 0,1\text{ mm}$.



Obr. 11. Porovnání příkonu míchadel **a)** potřebného pro dosažení stavu vznosu resp. **b)** potřebného pro udržení částic ve vznosu pro střední objemový průměr částic $d_p = 1\text{ mm}$.



Obr. 12. Míchadla testovaná pro míchání neneutonských jemnozrnných suspenzí: **a)** – standardní šestilopátkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem 45° , **b)** – etážové míchadlo tvořené tří (3SL) a šestilopátkovými (6SL) míchadly se skloněnými lopatkami pod úhlem 45° , **c)** – šroubové míchadlo s usměrňovacím válcem, **d)** – etážové míchadlo tvořené míchadlem se zakřivenými lopatkami a axiálním třílopatkovým míchadlem.

V případech, kdy je koncentrovaná suspenze tvořena jemnými částicemi o rozměrech řádově μm až desítek μm , dochází ke změně tokových vlastností suspenze, která začne vykazovat neneutonské chování. Při míchání neneutonských suspenzí rychloběžnými míchadly vzniká nebezpečí, že v oblastech vzdálených od míchadla je nízké smykové napětí a tedy vysoká zdánlivá viskozita a v důsledku toho tam kapalina prakticky neproudí. K proudění dochází pouze u míchadla, kde dojde ke vzniku dobře promíchané kaverny, čemuž je třeba zabránit a zajistit cirkulaci v celé vsádce. Návrhovým parametrem míchacích zařízení pro míchání takových suspenzí je tedy dosažení cirkulace suspenze v celé vsádce, čehož lze dosáhnout vhodnou geometrickou konfigurací míchacího zařízení. Příklady experimentálně testovaných konfigurací míchadel jsou znázorněny na obr. 12. Touto problematikou se zabývá systematický výzkum probíhající v současné době a první výsledky jsme publikovali v [Rie06].

Z těchto počátečních experimentů se ukázalo, že pro zajištění cirkulace míchané vsádky při míchání koncentrovaných neneutonských suspenzí jsou nejvýhodnější etážová míchadla větších průměrů (obr. 12b). Příkon potřebný pro uvedení celé suspenze do dostatečného pohybu zde může být při správném umístění těchto míchadel v suspenzi až o polovinu nižší než u standardního šestilopátkového míchadla.

5. SHRNU TÍ ZÁVĚRŮ A DOPORUČENÍ

Geometrické uspořádání standardního míchacího zařízení

- Z experimentálního sledování průběhu suspendace v nádobě s rovným dnem plyne, že její největší nedostatek spočívá v ostrém přechodu mezi rovným dnem a pláštěm nádoby, ve kterém klesá intenzita míchání a zdržují se usazené částice, což má za následek výrazný nárůst hodnot otáček vznosu a tím i příkonu potřebného k dosažení stavu vznosu. Tento nedostatek lze odstranit konstrukční úpravou dna nádoby spočívající v odstranění ostrého přechodu mezi dnem a pláštěm nádoby případně v úpravě prostoru dna pod míchadlem. Kuželový přechod sice značně sníží frekvenci otáčení i příkon míchadla potřebný k uvedení částic do vznosu oproti nádobě s rovným dnem, avšak pro dosažení stavu vznosu je energeticky nejvýhodnější nádoba s klenutým dnem a to v širokém rozsahu velikostí a koncentrací částic v suspenzi.
- Úpravou tvaru a polohy radiálních narážek standardně instalovaných do nádoby míchacího zařízení se sice nedosáhne výrazné energetické úspory, avšak díky eliminaci mrtvých zón proudění jsou všechny tyto úpravy standardních narážek výhodné zejména z provozních a technologických důvodů (např. jednotná kvalita produktu, dobrá čistitelnost a sanitace aparátu).
- Z výsledků experimentálního sledování vlivu výšky hladiny na suspendaci ve válcové nádobě s rovným dnem plyne, že kolísání hladiny kapaliny v rozsahu od 0,75 do 2- násobku průměru nádoby prakticky neovlivňuje okamžik vznosu pevné fáze, avšak ovlivňuje homogenitu suspenze.
- Na základě mnoha experimentálních prací lze shrnout, že z hlediska příkonu míchadla potřebného pro dosažení stavu vznosu je optimální výška spodní hrany lopatek standardních axiálních míchadel nade dnem nádoby v rozmezí od jedné třetiny až do poloviny průměru míchadla $H_2/d = 1/3 \div 1/2$ a optimální poměr průměru nádoby k průměru míchadla se pohybuje kolem hodnoty $D/d = 3$.

Rychloběžná axiální míchadla pro míchání suspenzí

- Systematicky byly proměřeny suspenzační účinky různých typů a geometrií axiálních míchadel v širokém rozsahu fyzikálních vlastností míchaných suspenzí ve válcových nádobách s klenutým dnem. Výsledky těchto experimentů byly vyhodnoceny ve tvaru bezrozměrných suspenzačních a příkonových charakteristik umožňujících v geometricky podobných míchacích zařízeních výpočet frekvence otáčení a příkonu na hřídeli míchadla potřebných pro dosažení vznosu částic. Suspenzační účinnost proměřovaných axiálních míchadel byla porovnána na základě bezrozměrného příkonu potřebného k suspendaci pevné fáze:

- Všechna *hydrodynamicky optimalizovaná míchadla* mají výrazně menší energetické nároky na suspendaci než standardní třílopatková míchadla se skloněnými lopatkami.
- Všechna *hydrodynamicky optimalizovaná míchadla* vykazují prakticky stejnou suspenzační účinnost, jsou-li porovnávána pro jejich energeticky optimální výšku nade dnem.
- *Míchadlo s rovnými lomenými lopatkami* mající výrazně jednodušší geometrický tvar lopatek dle CVS 69 1043 má prakticky stejné, případně i mírně nižší, energetické nároky na suspendaci jako proměřovaná zahraniční hydrodynamicky optimalizovaná míchadla, přičemž prakticky nezáleží na počtu lopatek tohoto míchadla.
- Při sledování vlivu sklonu lopatek *třílopatkového míchadla se skloněnými lopatkami* bylo zjištěno, že v oblasti relativně menších částic vykazuje nejnižší příkon potřebný pro suspendaci míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem 45° , ale v oblasti relativně velkých částic jsou energeticky výhodnější míchadla s menším sklonem lopatek.
- Průběh suspendace v míchané vsádce míchacího zařízení s *etážovými míchadly* tvořenými tří a šestilopatkovými míchadly se skloněnými lopatkami pod úhlem 45° byl porovnán se suspenzačními účinky jednoho standardního šestilopatkového míchadla s lopatkami skloněnými pod úhlem 45° v širokém rozsahu velikostí i koncentrací částic v suspenzi:
 - Frekvence otáčení etážových míchadel potřebná pro dosažení stavu vznosu, resp. potřebná pro udržení částic ve vznosu roste s klesajícím počtem lopatek i s klesající vzdáleností míchadel tvořících míchadlo etážové.
 - Z hlediska příkonu etážových míchadel potřebného pro dosažení stavu vznosu částic, resp. potřebného pro udržení částic ve vznosu se jeví jako nejvýhodnější etážová míchadla s největší vzájemnou vzdáleností míchadel, tj. $H_3/d = 1,25$. Zároveň příkon těchto etážových míchadel prakticky nezávisí na počtu jejich lopatek.
 - V oblasti nižších koncentrací částic v suspenzi je z energetického hlediska výhodnější užít pouze samostatné standardní šestilopatkové axiální míchadlo. Naopak pro větší koncentrace zvláště v oblasti relativně větších částic vykazují etážová axiální míchadla nižší příkon potřebný pro vytvoření homogenní suspenze v míchané vsádce než samotné standardní axiální míchadlo.
 - Etážová míchadla větších průměrů jsou také vhodná pro zajištění cirkulace míchané vsádky při míchání koncentrovaných neneutonských suspenzí.

Seznam použitých symbolů a označení

A_i	konstanta v rov. (3)	[1]
B_i	konstanta v rov. (3)	[1]
C_i	koeficient v rov. (2)	[1]
c_v	střední objemová koncentrace pevné fáze	[1]
D	průměr nádoby	[m]
d	průměr míchadla	[m]
d_p	střední objemový průměr částic	[m]
Fr'	modifikované Froudovo číslo $Fr' = \frac{\rho n^2 d}{g \Delta \rho}$	[1]
g	gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
H	výška hladiny	[m]
H_2	vzdálenost spodní hrany lopatek míchadla ode dna	[m]
H_3	vzájemná vzdálenost míchadel tvořících etážové míchadlo	[m]
h	šířka lopatky míchadla	[m]
I	elektrický proud	[A]
i_L	počet lopatek	[1]
n	frekvence otáčení míchadla	[s ⁻¹]
n_{cr}	frekvence otáčení míchadla potřebná pro dosažení vzhosu částic	[s ⁻¹]
P	příkon míchadla	[W]
Po	příkonové číslo $Po = \frac{P}{\rho_{su} n^3 d^5}$	[1]
r	poloměr	[m]
s	stoupání náhradní šroubové plochy	[m]
α	úhel sklonu lopatek	[°]
α_i	konstanta v rov. (4)	[1]
β	úhel sklonu lopatek	[°]
β_i	konstanta v rov. (4)	[1]
γ	úhel sklonu lopatek	[°]
γ_i	koeficient v rov. (2)	[1]
π_s	bezrozměrný příkon potřebný pro suspendaci $\pi_s = \frac{P}{\rho_{su}} \left(\frac{\rho}{g \Delta \rho} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{D} \right)^{\frac{7}{2}}$	[1]
ρ	hustota kapaliny	[kg·m ⁻³]
ρ_{su}	hustota suspenze	[kg·m ⁻³]
$\Delta \rho$	rozdíl hustoty pevné fáze a kapaliny	[kg·m ⁻³]

Seznam použité literatury

- [Arm98] Armenante, P. M., Nagamine, E. U., Susanto J.: *Determination of correlations to predict the minimum agitation speed for complete solid suspension in agitated vessels*. Can. J. Chem. Eng., 1998, roč. 76, s. 413-419.
- [Bal78] Baldi, G., Conti, R., Alaria, E.: *Complete Suspension of Particles in Mechanically Agitated Vessels*. Chem. Eng. Sci., 1978, roč. 33, s. 21-25.
- [Dit06] Ditzl, P., Rieger, F.: *Designing Suspension-Mixing Systems*. Chemical Engineering Progress (CEP), 2006, roč.102, č. 1, s. 22-30.

- [Cha83] Chapman, C. M., Nienow, A. W., Cooke, M., Middleton, J. C.: *Particle-gas-liquid mixing in stirred vessels – Part I: Particle-liquid mixing*. Chem. Eng. Res. Des., 1983, roč. 61, s. 71-81.
- [Chu85] Chudacek, M.W.: *Solids suspension behaviour in profiled bottom and flat bottom mixing tanks*. Chem. Eng. Sci., 1985, roč. 40, s.385-392.
- [Chu86] Chudacek, M.W.: *Relationship between solids suspension criteria, mechanism of suspension, tank geometry, and scale-up parameters in stirred tanks*. Ind. Eng. Chem. Fundam., 1986, roč. 25, s.391-401.
- [Jir99] Jirout, T., Rieger, F.: *Vliv úprav dna na suspendační účinky šestilopatkového míchadla*. In: 46. konference chemického a procesního inženýrství CHISA '99 [CD-ROM]. Praha: Procesní inženýrství Ing. J. Novosad, 1999, s. 1-9.
- [Jir00] Jirout, T., Major, M., Karcz, J., Rieger, F.: *Vliv výšky narážek nade dnem na suspendační účinky míchadel*. In: Míchání 2000 [CD-ROM]. Brno: Česká společnost chemického inženýrství, 2000, s. 1-10.
- [Jir01] Jirout, T., Rieger, F.: *Vliv výšky hladiny na suspendaci v míchacích zařízeních*. In: 28th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering [CD-ROM]. Bratislava: Slovenská spoločnosť chemického inženýrství, 2001, s. 1-6.
- [Jir05] Jirout, T., Moravec, J., Rieger, F., Sinevič, V., Špidla, M., Sobolík, V., Tihon, J.: *Electrochemical Measurement of Impeller Speed for off-Bottom Suspension*. Inżynieria Chemiczna i Procesowa (Chemical and Process Engineering). 2005, roč. 26, č. 3, s. 485-497.
- [Jir06a] Jirout, T., Moravec, J., Rieger, F.: *Electrochemical Measurement of Impeller Speed for off-Bottom Suspension – Effect of Electrolyte Properties*. In: Proceedings of the 12th European Conference on Mixing. Milano: AIDIC Servizi S.r.l., 2006, s. 423-430.
- [Jir06b] Jirout, T., Rieger, F.: *Impeller design for mixing of suspensions*. Zasláno k publikaci v časopise: Chemical Engineering and Processing, 2006.
- [Jir06c] Jirout, T., Rieger, F., Procházka, J.: *Míchání koncentrovaných suspenzí – užití etážových míchadel*. In: XIV Celostátní konference míchání a míchací zařízení, čerpadla, ucpávky a těsnění „Míchání 2006“ [CD-ROM]. Brno: Česká společnost chemického inženýrství, 2006, s. 1-8.
- [Kas05] Kasat, G. R., Pandit, A. B.: *Review on Mixing Characteristics in Solid-Liquid and Solid-Liquid-Gas Reactor Vessels*. Can. J. Chem. Eng., 2005, roč. 83, s. 618-643.
- [Kra88] Kraume, M., Zehner, P.: *Suspendieren im Rührbehälter – Vergleich unterschiedlicher Berechnungsgleichungen*. Chem. Ing. Tech., 1988, roč. 60, č. 11, s. 822-829.
- [Lie98] Liepe, F., Sperling, R., Jembere, S.: *Rührwerke, Theoretische Grundlagen, Auslegung und Bewertung*. Köthen: Fachhochschule Köthen, 1998, 548 s.
- [Med01] Medek, J., Seichter, P.: *Míchací zařízení se šípovými narážkami*. In: 48. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2001 [CD-ROM]. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2001, s. 1-4.
- [Mye92] Myers, K. J., Fasano, J. B.: *The influence of baffle off-bottom clearance on the solids suspension performance of pitched-blade and high efficiency impellers*. Can. J. Chem. Eng., 1992, roč. 70, s. 596-598.
- [Mye94] Myers, K. J., Fasano, J. B., Corpstein, R. R.: *The influence of solids properties on the just-suspended agitation requirements of pitched-blade and high-efficiency impellers*. Can. J. Chem. Eng., 1994, roč. 72, s. 745-748.
- [Nie68] Nienow, A. W.: *Suspension of solid particles in turbine agitated baffled vessels*. Chem. Eng. Sci., 1968, roč. 23, č. 12, s. 1453-1459.

- [Rie93] Rieger, F.: *Efficiency of agitators while mixing of suspensions*. In: 6th Polish Seminar on Mixing. Zakopane: Politechnika Kraków, 1993, s. 79-85.
- [Rie94] Rieger, F., Ditzl, P.: *Suspension of solid particles*. Chem. Eng. Sci., 1994, roč. 49, č. 14, s. 2219-2227.
- [Rie00a] Rieger, F.: *Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension*. Chem. Eng. J., 2000, roč. 79, s. 171-175.
- [Rie00b] Rieger, F., Ditzl, P.: *Mixing equipment for particle suspension – generalized approach to designing*. In: Proceedings of 10th European Conference on Mixing. Amsterdam: Elsevier, 2000, s. 415-422.
- [Rie02] Rieger, F.: *Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension*. Chem. Eng. Proces., 2002, roč. 41, s. 381-384.
- [Rie06] Rieger, F., Moravec, J., Jirout, T.: *Effect of Particle Content on Mixing of Fine Suspensions*. In: Proceedings of 16th International Conference “Process Engineering and Chemical Plant Design”. Berlin: Technische Universität Berlin, 2006, s. 140-148.
- [Sei05] Seichter, P., Pešl, L.: *Navrhování rotačních míchadel – věda nebo rutina?*. CHEMagazín, 2005, roč. 15, s. 8-11.
- [Sin99] Sinevič, V., Rieger, F.: *Míchání suspenzí rychloběžnými míchadly s axiálním tokem*. In: 46. konference chemického a procesního inženýrství CHISA '99 [CD-ROM]. Praha: Procesní inženýrství Ing. J. Novosad, 1999, s. 1-9.
- [Špi02a] Špidla, M., Sinevič, V.: *Impeller suspension characteristics for the critical impeller speed*. In: 29th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering [CD-ROM]. Bratislava: Slovenská spoločnosť chemického inženýrství, 2002, s. 1-10.
- [Špi02b] Špidla, M., Sinevič, V., Hnízdil, T.: *Mixing of suspension with axial-flow hydrofoil impellers*. In: 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002 [CD-ROM]. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2002, s. 1-11.
- [Špi03] Špidla, M., Sinevič, V., Hnízdil, T.: *Vliv nestandardních šípových narážek na suspenzační charakteristiky hydrofoilových míchadel*. In: 50. konference chemického a procesního inženýrství CHISA 2003 [CD-ROM]. Praha: Česká společnost chemického inženýrství, 2003, s. 1-12.
- [Špi05] Špidla, M., Sinevič, V., Machoň, V.: *Effect of baffle design on the off-bottom suspension characteristics of axial-flow impellers in a pilot-scale mixing vessel*. Chem. Biochem. Eng. Q., 2005, roč. 19, č. 4, s. 333-340.
- [Wu01a] Wu, J., Zhu, Y., Pullum, L.: *The Effect of Impeller Pumping and Fluid Rheology on Solid Suspension in a Stirred Vessel*. Can. J. Chem. Eng., 2001, roč. 79, s. 177-186.
- [Wu01b] Wu, J., Zhu, Y., Pullum, L.: *Impeller geometry effect on velocity and solids suspension*. Trans IChemE, 2001, roč. 79/A, s. 989-997.
- [Wu02] Wu, J., Zhu, Y., Pullum, L.: *Suspension of high concentration slurry*. AIChE J., 2002, roč. 48, s. 1349-1352.
- [Zwi58] Zwietering, T. N.: *Suspending of solid particles in liquid by agitators*. Chem. Eng. Sci., 1958, roč. 8, s. 244 – 253.

Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Místo a datum narození: Hradec Králové, 30. listopadu 1975

Vzdělání:

- 2000 – 2005 České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Ústav procesní a zpracovatelské techniky
Postgraduální doktorandské studium
Studijní obor: *Procesní technika a zpracovatelské systémy*
Disertační práce: *Míchání suspenzí (Práci byla udělena Cena rektora III. stupně za vynikající doktorskou práci)*
- 1994 – 2000 České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Magisterské studium
Studijní obor: *Stroje a zařízení pro chemický, potravinářský a spotřební průmysl*
Diplomová práce: *Zařízení pro míchání suspenzí*
- 1990 – 1994 Střední průmyslová škola strojnická Hradec Králové
Specializace: *Strojírenství*

Výzkumné a odborné zájmy: mechanické míchání; projektování a konstrukce aparátů; reologické a fyzikálně-chemické vlastnosti reálných látek

Vědeckovýzkumné projekty: podílel se na řešení 3 grantů GA ČR, 2 výzkumných záměrů MŠMT ČR a 1 grantu MPO ČR; řešitel 3 interních grantů ČVUT v Praze

Spolupráce s průmyslem: ŠKODA JS a.s., Lučební závody DRASLOVKA a.s., LASAK s.r.o., FORMICA-CZ s.r.o., SPOLANA a.s., ELEKTROPORCELÁN LOUNY a.s., NUTRICIA DEVA a.s., Robert BOSCH s.r.o., P APKON s.r.o., NATURA a.s., B.E.T. spol. s.r.o.

Výuka: Hydromechanické procesy, Hydromechanická zařízení, Přenos hybnosti tepla a hmoty, Konstrukční projekty, Experimentální práce, Chemie

Publikace: autor či spoluautor 3 článků v mezinárodních impaktovaných odborných časopisech, 8 článků v zahraničních odborných časopisech, 2 článků v českých odborných časopisech, 31 příspěvků na mezinárodních odborných konferencích, 29 příspěvků na českých odborných konferencích a 2 vysokoškolských skript