

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

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

Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

**Využití teoretických a experimentálních poznatků pro
optimalizaci procesu míchání a míchacích zařízení**

**Application of theoretical and experimental findings to
optimization of mixing processes and equipment**

Summary

A mixing of liquid media is the one of the most common operations in the chemical, biochemical, food and consumer industry. The homogenization of the agitated batch and ensuring the particle suspension are the most frequently encountered requirements in terms of the mixing purpose. These operations are affected by flow in the agitated batch. The geometrical parameters of the mixing system, especially the shape of the impeller blade affect character of the flow in the agitated batch.

The present work deals with general description of the most common processes in the agitated batch (blending and particle suspension) and with hydrodynamic parameters (flow in agitated batch, pumping and circulating capacity of impellers) and geometrical configuration of the mixing equipment (shape of vessel, baffle and impeller and their mutual arrangement) that influence the process. The dimensionless process characteristics of the impeller were derived by the theoretical analysis. These characteristic were applied to evaluate the extensive set of the experimental data with various geometric configuration of the mixing equipment. The optimization of the construction and arrangement of the mixing equipment were performed to ensure the specified process with minimum energy consumption.

The shape of the velocity profile at the outflow of the hydrofoil impeller, the streamlined flow of the batch within cylindrical vessel equipped by radial baffles and their high hydrodynamic efficiency are main qualities that predestine these impellers for enhancement homogenization and particle suspension processes especially with regard to minimizing energy requirements. The followed experiments confirmed the energy benefits when the hydrofoil impellers are applied for both process of the homogenization of the batch and mixing of the suspension compared to the pitched blades impellers. In case of the suspensions mixing in the vessel equipped by baffles where the density of particles is higher than liquid, these impellers should be placed above bottom of the vessel and pumping should be downwards the bottom. Conversely, if the particles of the suspension are lighter than liquid, these impellers should be placed near liquid level and pumping should be upwards the level. The multi-stage impellers installed in the cylindrical vessel equipped by baffles are the most suitable impellers to ensure the required flow and circulation in the entire volume of the stirred batch during mixing of the concentrated, fine-grained or heterogeneous suspensions considering the required degree of the suspension homogeneity and energy demands of the process. The processes occurred within the agitated batch affected by hydrodynamics parameters of impeller are sensitive to the blade shape and its changes. This conclusion should be borne in mind when it is necessary to modify the blade shape, e.g. by the edges rounding of the enamelled impellers, or when the impeller shape is changed by erosion wear.

Souhrn

Míchání v kapalném prostředí je jednou z nejrozšířenějších operací v chemickém, potravinářském a spotřebním průmyslu. Z hlediska účelu míchání se nejčastěji setkáváme s požadavky na homogenizaci míchané vsádky a zajištění suspendace částic v kapalině. Tyto operace jsou ovlivněny prouděním v míchané vsádce. Charakter proudění v míchané vsádce je ovlivněn geometrickými parametry míchaného systému a zejména tvarem lopatek míchadel.

Předložená práce se zabývá souhrnným popisem nejčastějších procesů probíhajících v míchané vsádce (homogenizace a suspendace) a jejich ovlivněním hydrodynamickými parametry (proudění v míchané vsádce, čerpací a cirkulační účinky míchadel) i geometrickou konfigurací míchacích zařízení (tvar nádoby, nárážek a míchadla a jejich vzájemné uspořádání). Na základě teoretického rozboru byly navrženy bezrozměrné procesní charakteristiky míchadel, které poté byly použity pro vyhodnocení rozsáhlého souboru experimentů s různou geometrickou konfigurací míchacích zařízení. Optimalizace konstrukce a uspořádání míchacích zařízení byla provedena na základě vyhodnocení energie potřebné pro zajištění požadovaného procesu.

Tvar rychlostního profilu na výtoku z hydrodynamicky optimalizovaných (hydrofoil) míchadel, usměrněný tok vsádky ve válcové nádobě vybavené radiálními nárážkami a jejich vysoká hydraulická účinnost předurčuje tato míchadla pro zvýšení efektivity procesů homogenizace a suspendace a to zejména s ohledem na minimalizaci energetických nároků. Následné experimenty potvrdily energetickou výhodnost použití hydrofoil míchadel pro homogenizaci míchané vsádky i míchání suspenzí oproti míchadlům se skloněnými lopatkami. Pro míchání suspenzí částic těžších než kapalina je výhodné, aby tato míchadla byla umístěna v nádobě s radiálními nárážkami nade dnem a čerpala směrem ke dnu. Naopak pro míchání suspenzí částic lehčích než kapalina je třeba, aby míchadla byla umístěna pod hladinou a čerpala směrem k hladině. Při míchání koncentrovaných, jemnozrnných nebo heterogenních suspenzí je z hlediska zajištění požadované homogenity suspenze a energetické náročnosti procesu vhodné do válcové nádoby s nárážkami instalovat etážové míchadlo zajišťující potřebné proudění a cirkulaci v celém objemu míchané vsádky. Procesy probíhající v míchané vsádce ovlivněné hydrodynamickými parametry míchadel jsou značně citlivé na tvar lopatek a jeho změny. Tento závěr je nutno mít na paměti v případech, kdy je třeba upravit tvar lopatek, např. zaoblením pro smaltovaná míchadla anebo v případech, kdy dochází ke změně tvaru lopatek jejich opotřebením.

Klíčová slova: míchání, axiální míchadlo, hydrodynamicky optimalizované míchadlo, etážové míchadlo, tvar dna, tvar narážek, čerpací účinky, homogenizace, suspendace, účinnost míchání

Key Words: mixing, axial impeller, hydrofoil impeller, multi-stage impeller, bottom shape, baffle shape, pumping capacity, blending, particle suspension, impeller efficiency

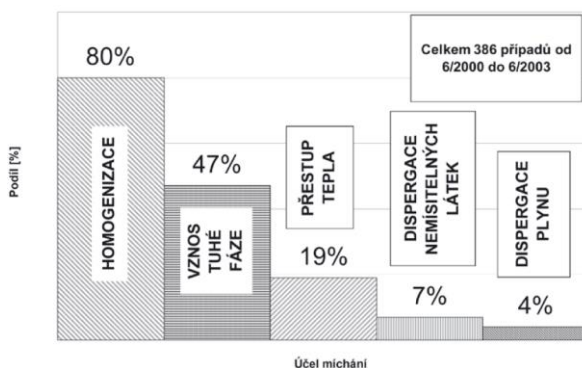
Obsah

1. Úvod	6
2. Proudění v míchané vsádce	7
2.1. Charakter toku v míchané vsádce	7
2.2. Rychlostní pole v míchané vsádce	9
2.3. Čerpací účinky rotačních míchadel	11
2.4. Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla	12
2.5. Etážová míchadla	15
3. Homogenizační účinky míchadel	16
3.1. Homogenizace v míchané vsádce	16
3.2. Geometrická konfigurace míchacího zařízení	18
3.2.1. <i>Použití narážek ve válcové nádobě</i>	18
3.2.2. <i>Tvar lopatek a geometrická konfigurace míchadla</i>	18
4. Suspendační účinky míchadel	20
4.1. Popis průběhu suspendace	20
4.2. Vznos pevné fáze	22
4.3. Geometrická konfigurace zařízení pro míchání suspenzí částic těžších než kapalina	23
4.3.1. <i>Nádoba míchacího zařízení</i>	23
4.3.2. <i>Použití narážek ve válcové nádobě</i>	24
4.3.3. <i>Tvar lopatek a geometrická konfigurace míchadla</i>	24
4.4. Geometrická konfigurace zařízení pro míchání suspenzí částic lehčích než kapalina	27
4.5. Geometrická konfigurace zařízení pro míchání heterogenních suspenzí	28
4.6. Geometrická konfigurace zařízení pro míchání jemnozrnných koncentrovaných suspenzí	29
5. Speciální aspekty konstrukce míchacích zařízení	30
6. Závěr	31
Seznam symbolů	32
Seznam zkratk	33
Seznam použité literatury	34

1. Úvod

Míchání v kapalném prostředí je jednou z nejrozšířenějších operací v chemickém, potravinářském a spotřebním průmyslu. Účelem míchání je intenzifikace přenosu tepla a hmoty a příprava směsí požadovaných vlastností, např. suspenzí a emulzí. V míchacích zařízeních se používají tři základní principy míchání – hydraulické, pneumatické a mechanické, příp. při společném průtoku látek potrubím se používají tvarované vestavby vkládané do potrubí zajišťující radiální směšování kapalin, tzv. statické směšovače. Nejčastěji se v průmyslu vykytují míchací zařízení s mechanickým rotačním míchadlem, které vytváří v nádobě nucené proudění.

Z hlediska účelu míchání se nejčastěji setkáváme s požadavky na homogenizaci míchané vsádky a zajištění suspendace částic v kapalině, což je patrné z přehledu uvedeného na obr. 1. Tyto operace jsou ovlivněny prouděním v míchané vsádce, kdy primární tok kapaliny ovlivňující zejména suspendaci pevné fáze je vyvolán čerpacími účinky mechanického míchadla (Fořt, 1986). Vlivem přenosu hybnosti mezi kapalinou vytékající z rotorové oblasti míchadla a obklopujícím prostředím vzniká ve zbylém objemu indukované proudění, které ovlivňuje homogenitu míchané vsádky. Charakter proudění v míchané vsádce je ovlivněn geometrickými parametry míchaného systému a zejména tvarem lopatek míchadel.



Obr. 1. Rozložení účelu míchání v průmyslových míchacích zařízeních (Seichter a Pešl, 2005).

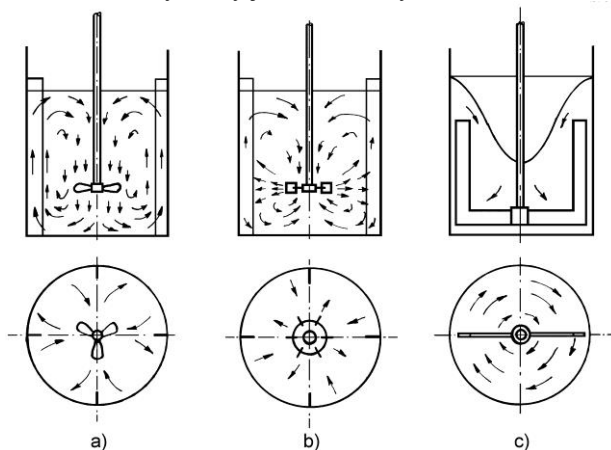
Pro projektování, konstrukci a provozování míchacích zařízení je třeba stanovit frekvenci otáčení míchadla potřebnou pro zajištění požadovaného procesu probíhajícího v míchané vsádce a příkon na hřídeli míchadla pro dimenzování pohonu. Tyto návrhové parametry, závislé nejen na geometrické konfiguraci míchacího zařízení (tvar nádoby, vestavby

v nádobě, typ míchadla a jejich vzájemné geometrické uspořádání), ale i na fyzikálně-chemických vlastnostech míchané vsádky jsou určovány experimentálně na geometricky podobném modelovém míchacím zařízení. Vyhodnocení experimentů v podobě vhodných bezrozměrných procesních charakteristik pak umožní použití těchto výsledků pro návrh provozních zařízení a volbu optimální geometrické konfigurace zařízení nejen z hlediska zajištění požadovaného procesu, ale i z hlediska minimalizace provozních energetických nákladů.

2. Proudění v míchané vsádce

2.1. Charakter toku v míchané vsádce

Primárním účinkem mechanického míchadla je proudění a cirkulace míchané kapaliny v nádobě. Rotační mechanická míchadla v závislosti na své geometrii vyvolávají v nádobě axiální, radiální či tangenciální charakter proudění míchané vsádky, který je schematicky znázorněn na obr. 2.

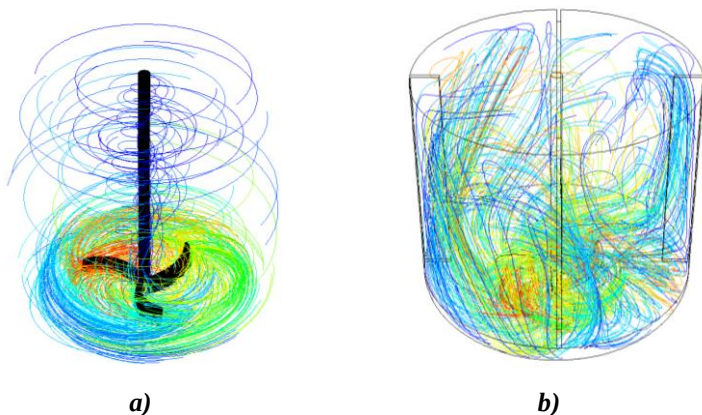


Obr. 2. *Proudění v míchané vsádce s rotačními míchadly (Rieger a kol., 2005).*

a – axiální proudění, nádoba s narážkami, b – radiální proudění, nádoba s narážkami, c – tangenciální proudění, nádoba bez narážek

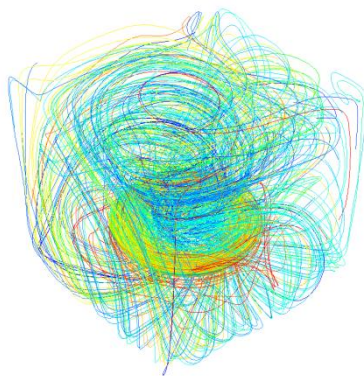
Nejčastěji se v průmyslu vyskytují míchací zařízení s válcovou nádobou a s osově umístěným mechanickým rotačním míchadlem, které vytváří v nádobě nucené proudění. V případě, že je třeba potlačit tangenciální tok v míchané vsádce a zamezit tvorbě středového víru, vybavují se válcové nádoby vestavbami v podobě různě tvarovaných narážek (radiální, trubkové, prstové, ...). Tím je posílen axiální tok a intenzita cirkulace v míchané vsádce, což má za následek výrazné zlepšení

homogenizace mísitelných kapalin i heterogenních směsí v míchané vsádce. Ukázka proudění ve válcové nádobě bez narážek a se dvěma radiálními narážkami s radiálním míchadlem se zakřivenými lopatkami je znázorněna na obr. 3. V mnohých aplikacích není možné, např. z důvodu sanitace či povrchové úpravy, nádobu vybavit vestavbami v podobě narážek. V případě vazkého proudění vysokoviskózních látek je možné posílit axiální tok vhodnou konfigurací míchadla. Při turbulentním proudění v nádobě bez narážek je možné tangenciální tok částečně potlačit pomocí excentrického, případně šikmo skloněného umístění míchadla v nádobě.



Obr. 3. Proudění ve válcové nádobě bez (a) a se dvěma radiálními narážkami s míchadlem se zakřivenými lopatkami.

Občas je třeba z důvodů zástavbového plánu a úspory prostoru zajistit proces míchání v nádobě čtvercového nebo obdélníkového průřezu. Z obr. 4 je zřejmé, že ostré rohy nádoby narušují tangenciální proudění a prakticky plní funkci radiálních narážek. Posílení axiálního toku vlivem ostrých hran v aparátu bylo využito při realizacích reaktorů se čtvercovým půdorysem instalovaných v Lučebních závodech Draslovka a.s. nebo v kompaktních čistírnách odpadních vod firmy IPRA CZ s.r.o.



Obr. 4. Proudění v nádobě se čtvercovým půdorysem s axiálním míchadlem.

2.2. Rychlostní pole v míchané vsádce

Údaje o rozložení rychlosti a tlaku v míchané kapalině by bylo možno získat řešením soustavy parciálních diferenciálních rovnic – rovnice kontinuity a Navier-Stokesovy rovnice. Analytické řešení této soustavy rovnic není možné z důvodu složitosti sledovaného systému nádoby s míchadlem. Proto je nutné omezit se pouze na inspekční analýzu těchto rovnic např. (Rieger a kol., 2005), ze které vyplývá, že bezrozměrná rychlost $\vec{u}^* = \frac{\vec{u}}{nd}$ i tlak $p^* = \frac{p}{\rho n^2 d^2}$ jsou v geometricky podobných

systémech funkcí bezrozměrné polohy $\vec{x}^* = \vec{x}/d$, bezrozměrného času $t^* = nt$ a modifikovaného Reynoldsova čísla $Re = \frac{nd^2 \rho}{\mu}$

$$\vec{u}^* = f_1(\vec{x}^*, t^*, Re) \text{ resp. } p^* = f_2(\vec{x}^*, t^*, Re). \quad (1, 2)$$

Časová závislost má při ustáleném proudění periodický charakter, který je způsoben geometrickým tvarem míchadla, resp. nádoby. Časová závislost rychlosti a tlaku se obvykle zanedbává a okamžité veličiny jsou nahrazeny časově středními hodnotami $\tilde{\vec{u}}, \tilde{p}$:

$$\tilde{\vec{u}}^* = f_1(\vec{x}^*, Re) \text{ resp. } \tilde{p}^* = f_2(\vec{x}^*, Re) \quad (3, 4)$$

Pro *velké* hodnoty modifikovaného Reynoldsova čísla, resp. pro vyvinuté turbulentní proudění, lze zanedbat vliv vazkých sil. Na základě inspekční analýzy přejdou rovnice (3) resp. (4) do tvaru

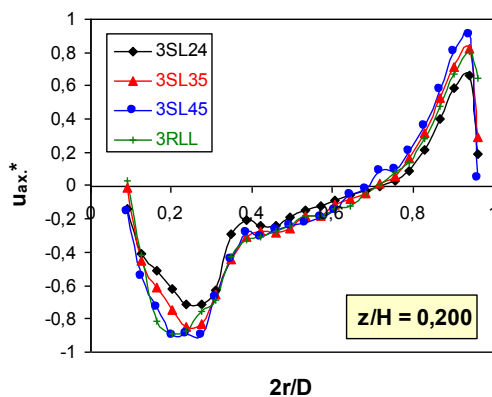
$$\tilde{\vec{u}}^* = f_1(\vec{x}^*) \text{ resp. } \tilde{p}^* = f_2(\vec{x}^*). \quad (5, 6)$$

Ukázky axiálních rychlostních profilů v míchané vsádce a na výtoku z rotorové oblasti míchadla jsou pro turbulentní proudění vyvolané axiálním míchadlem znázorněny na obr. 5 a 6.

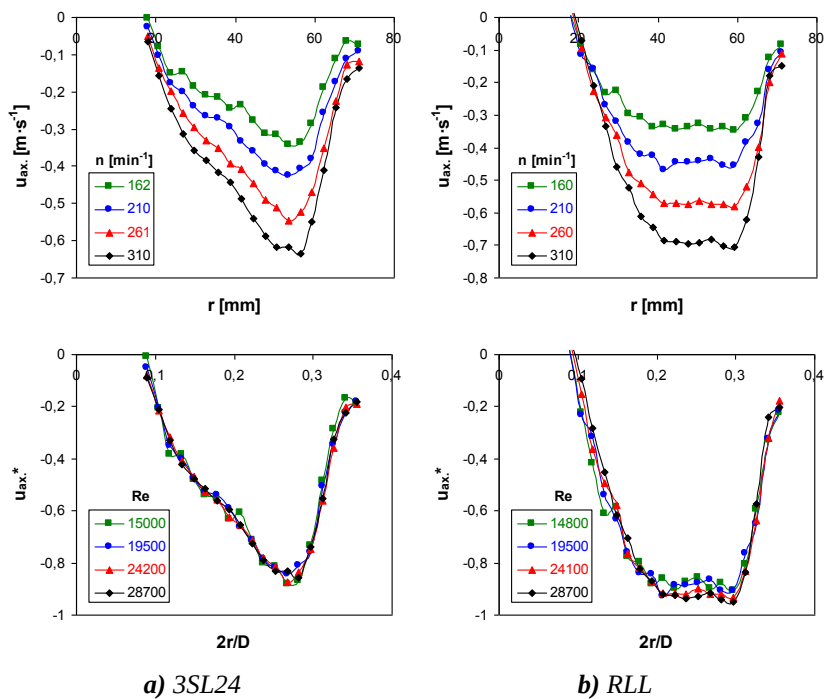
V oblasti *malých* hodnot Reynoldsova čísla (oblast plouživého proudění) jsou zanedbatelné setrvačné síly. Proto je třeba při převádění Navier-Stokesovy rovnice do bezrozměrného tvaru dělit tuto rovnici výrazem u člena, který vyjadřuje vliv vazkých sil. Potom přejde definice bezrozměrného tlaku do tvaru $p^+ = \frac{p}{\mu n}$. Z inspekční analýzy takto

upravených rovnic plyne:

$$\vec{u}^* = f_1(\vec{x}^*) \text{ resp. } p^+ = f_2(\vec{x}^*) \quad (7, 8)$$



Obr. 5. Bezrozměrné axiální rychlostní profily v mchané vsádce pro měřící hladinu procházející středem míchadla (Jirout, 2005).



Obr. 6. Axiální rychlostní profil a bezrozměrný axiální rychlostní profil v kapalině vytékající z míchadla (Jirout a kol., 2002).

2.3. Čerpací účinky rotačních míchadel

Čerpací výkonnost míchadla je definována jako objemové množství kapaliny vystupující z míchadla za jednotku času. Je-li známé rychlostní pole na výstupu z míchadla, lze čerpací výkonnost určit z rovnice

$$Q_P = \frac{1}{2} \int_S [\text{Sign}(\tilde{\mathbf{u}} \cdot \tilde{\mathbf{n}}) + 1] \tilde{\mathbf{u}} \cdot \tilde{\mathbf{n}} dS, \quad (9)$$

kde S je povrch válce o průměru rovném průměru míchadla a výšce rovné axiální výšce lopatek.

Po uvedení rov. (9) do bezrozměrného tvaru plyne z inspekční analýzy této rovnice, např. (Rieger a kol., 2005), že pro geometricky podobná uspořádání systému je bezrozměrná čerpací výkonnost tzv. průtokové číslo N_{QP} funkcí modifikovaného Reynoldsova čísla Re

$$N_{QP} = \frac{Q_P}{nd^3} = f(Re). \quad (10)$$

Pro *velké* hodnoty modifikovaného Reynoldsova čísla, resp. pro vyvinuté turbulentní proudění, při uvažování bezrozměrné rychlosti dle rov. (5) z inspekční analýzy plyne:

$$N_{QP} = \frac{Q_P}{nd^3} = \text{konst.} \quad (11)$$

Tento závěr platí analogicky i pro plouživé proudění při uvažování bezrozměrné rychlosti dle rov. (7).

Čerpací účinky míchadel se stanovují buď měřením střední doby cirkulace dvou po sobě jdoucích průchodů indikační částice kontrolní plochou, tj. v tomto případě míchadlem (tzv. flow-follower) – např. (Medek a Fořt, 1978), nebo integrací naměřených rychlostních profilů na výtoku z míchadla dle rov. (9) – např. (Wu a kol., 2001).

Primární tok kapaliny v míchané vsádce je vyvolán čerpacími účinky mechanického míchadla. Vlivem přenosu hybnosti mezi kapalinou vytékající z rotorové oblasti míchadla a obklopujícím prostředím vzniká ve zbylém objemu indukované proudění. Primární a indukovaná cirkulační smyčka je vidět na vizualizaci rozložení rychlostního pole v míchané vsádce s axiálním míchadlem znázorněné na obr. 7. Úhrnný objemový průtok míchané vsádky Q_T je pak možné získat jako součet čerpací výkonnosti míchadla Q_P a indukovaného průtoku Q_i

$$Q_T = Q_P + Q_i, \quad (12)$$

resp. po vydělení rov (12) nd^3 v bezrozměrné formě

$$N_{QT} = N_{QP} + N_{Qi}. \quad (13)$$

Pro porovnání čerpací resp. celkové cirkulační účinnosti míchadel bylo navrženo (Medek a Fořt, 1979) bezrozměrné energetické kritérium

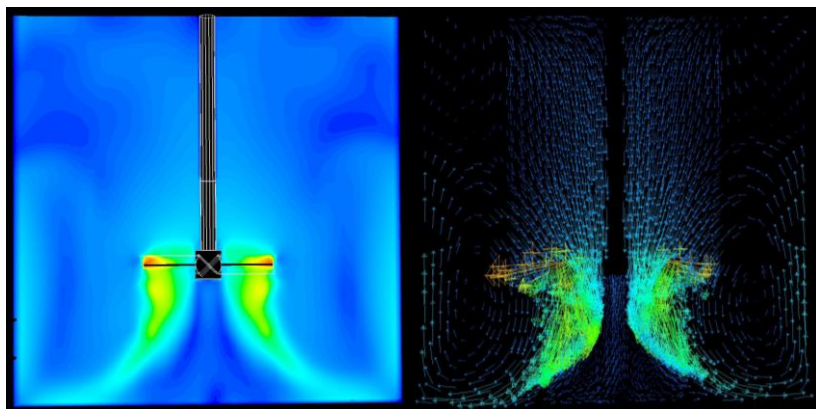
$$E_p = \frac{N_{QP}^3}{Po} \text{ resp. } E_T = \frac{N_{QT}^3}{Po}, \quad (14, 15)$$

kde Po je příkonové číslo vyjadřující bezrozměrný příkon na hřídeli míchadla. Z inspekční analýzy rovnic vyjadřujících silové účinky kapaliny působící na míchadlo, např. (Rieger a kol., 2005), plyne, že pro geometricky podobná uspořádání míchacího zařízení je příkonové číslo Po funkcí modifikovaného Reynoldsova čísla Re

$$Po = \frac{P}{\rho n^3 d^5} = f(Re). \quad (16)$$

Pro *velké* hodnoty modifikovaného Reynoldsova čísla, tj. v turbulentní oblasti proudění, nezávisí příkonové číslo Po na modifikovaném Reynoldsově čísle Re , tzn.

$$Po = \text{konst.} \quad (17)$$

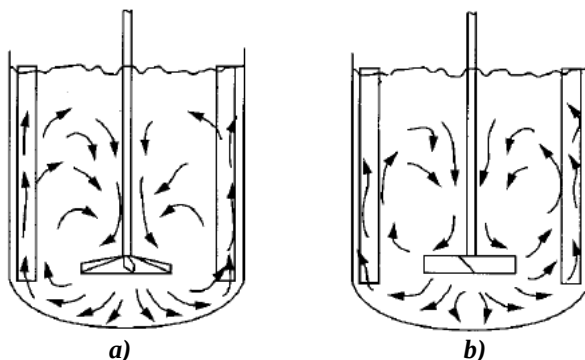


Obr. 7. Proudění v míchané vsádce s axiálním míchadlem.

2.4. Hydrodynamicky optimalizovaná míchadla

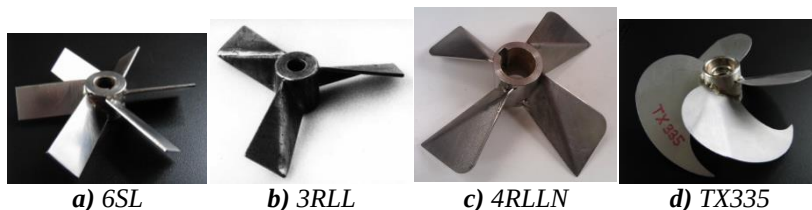
Z obr. 5 a 6 je zřejmé, že geometrická konfigurace míchacího zařízení a tvar lopatek míchadla mají zásadní vliv na rozložení rychlosti v míchané vsádce, čímž jsou ovlivňovány probíhající procesy míchání. V současnosti je trend konstruovat hydrodynamicky optimalizovaná míchadla s tvarovanými lopatkami tzv. *hydrofoil* míchadla. Většina firem produkujících míchací zařízení (např. Chemineer, Lightnin, Ekato i česká firma Techmix) používá vlastní vyvinuté typy hydrodynamicky optimalizovaných míchadel. Cílem je navrhnout míchadlo s tvarovanými lopatkami, které co nejvíce usměrní tok míchané vsádky při dosažení co nejvyšší hydraulické účinnosti, tj. nejvyšší využití energie dodané míchadlu

ve formě jeho příkonu na vyvolání jeho čerpacího výkonu a turbulence disipované mimo rotorovou oblast míchadla. Porovnání proudění v nádobě s axiálním hydrofoil míchadlem a standardním axiálním míchadlem se skloněnými lopatkami je znázorněno na obr. 8.



Obr. 8. Proudění v míchané vsádce s axiální hydrodynamicky optimalizovaným míchadlem (a) a standardním míchadlem se skloněnými lopatkami (b) – (Paul a kol., 2003).

Konstrukční úpravy tvaru lopatek spočívají v úpravě plochy lopatek a její ohýbání či lomení, což je zřejmé z ukázky vývojových typů axiálních hydrodynamicky optimalizovaných míchadel znázorněných na obr. 9. Na obr. 9a je znázorněn základní neoptimalizovaný typ míchadla se skloněnými obdélníkovými lopatkami. Nejjednodušší způsob tvarování lopatek je jejich úhlopříčné lomení (viz obr. 9b). Z obr. 6b je vidět, že již pouhé lomení lopatek má za následek rovnoměrný axiální výtok kapaliny z míchadla s prakticky pístovým rychlostním profilem. Dalším stupněm je zvětšování plochy lopatky a úprava jejího tvaru, čímž dojde nejen k usměrnění toku, ale i ke zlepšení dalších procesních charakteristik. Např. na obr. 9c je znázorněné míchadlo navržené autorem (Jirout a Rieger, 2012) nebo na obr 9d míchadlo navržené firmou Techmix s.r.o. Tvarování lopatek se provádí buď na základě provozních zkušeností nebo na základě experimentálního sledování procesů probíhajících v míchané vsádce (např. homogenizace, suspendace, dispergace) a rychlostního pole v míchané vsádce (např. pomocí LDA či PIV), příp. pomocí CFD simulací. Podrobnější informace o proudění v míchané vsádce s hydrodynamicky optimalizovanými míchadly uvádí (Kumaresan a Joshi, 2006; Jirout a kol., 2003; Fořt a kol., 2010).



Obr. 9. *Vývojové stupně axiálních hydrodynamicky optimalizovaných míchadel.*

Procesy probíhající v míchané vsádce jsou ovlivněny nejen charakterem toku, ale i čerpací a cirkulační výkonností míchadla. Z tohoto důvodu byly na základě měření rychlostního pole v míchané vsádce pomocí LDA vyhodnoceny tyto parametry celé řady standardizovaných i hydrodynamicky optimalizovaných axiálních míchadel používaných pro homogenizaci a suspendaci zejména v turbulentní oblasti proudění. Čerpací a cirkulační účinky těchto míchadel byly porovnány na základě jejich hydraulické účinnosti definované dle rov. (14) resp. (15). Ze shrnutí výsledků uvedených v tab. 1 a tab. 2 je zřejmé, že všechna hydrodynamicky optimalizovaná míchadla vykazují vyšší čerpací účinnost než míchadla se skloněnými netvarovanými lopatkami.

Tvar rychlostního profilu na výtoku z hydrodynamicky optimalizovaných míchadel, usměrněný tok kapaliny v míchané vsádce a jejich vysoká čerpací účinnost předurčuje tato míchadla pro zvýšení efektivity procesů homogenizace a suspendace a to zejména s ohledem na minimalizaci energetických nároků.

Tabulka 1. *Čerpací účinky axiálních míchadel v turbulentní oblasti proudění – válcová nádoba s klenutým dnem a čtyřmi radiálními narážkami, $H/D = 1$, $d/D = 0,36$, $H_2/d = 0,5$ (Jirout a kol., 2003).*

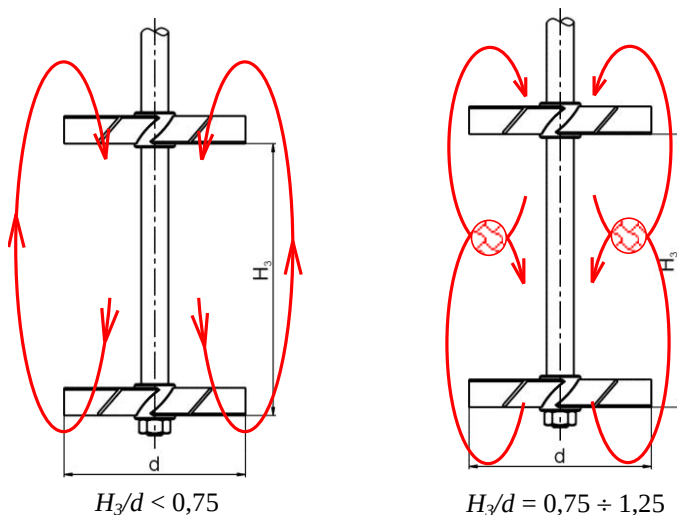
Míchadlo	$N_{QP(ax.)}$	P_o	E_p
3SL24	0,41	0,37	0,183
3SL35	0,51	0,79	0,168
3SL45	0,56	1,27	0,138
6SL	0,65	1,81	0,148
3RLL	0,51	0,79	0,170
MP(EKATO)	0,42	0,44	0,168
P(FH)	0,44	0,45	0,186

Tabulka 2. Čerpací a cirkulační účinky axiálních míchadel v turbulentní oblasti proudění – válcová nádoba s rovným dnem a čtyřmi radiálními narážkami, $H/D = 1$, $D/d = 3$, $H_3/d = 1$ (Fořt a kol., 2010).

Míchadlo	N_{QP}	N_{QT}	Po	E_P	E_T
6SL	0,844	1,76	1,660	0,362	3,284
TX535	0,604	1,21	0,671	0,328	2,640
TX445	0,714	1,364	0,860	0,423	2,951
TX335	0,770	1,367	0,944	0,483	2,706

2.5. Etážová míchadla

Pro zajištění zejména homogenity míchané vsádky je v případě míchání ve štíhlých nádobách ($H/D > 1$) nebo při míchání nelineárních látek účelné instalovat více míchadel na společný hřídel tzv. *etážová míchadla*. Každé míchadlo zajistí čerpání a cirkulaci vsádky ve svém bezprostředním okolí a vlivem přenosu hybnosti mezi těmito dílčími cirkulačními smyčkami dojde k proudění a cirkulaci celé míchané vsádky, což je třeba pro homogenizaci. Přehled užití etážových míchadel a optimalizace jejich konfigurace je uvedena v (Gorate a kol., 2000).



Obr. 10. Proudění v nádobě s axiálním etážovým míchadlem (Jirout, 2013).

Ve štíhlých nádobách je doporučena vzdálenost mezi jednotlivými míchadly v rozmezí od jednoho až dvou násobku průměru míchadla ($H_3/d = 1 \div 2$), kdy při vzdálenosti rovné přibližně dvojnásobku průměru míchadel se již cirkulační zóny jednotlivých míchadel neovlivňují, avšak dochází k dostatečnému přenosu hybnosti mezi nimi. Další zvětšování vzájemné vzdálenosti míchadel ($H_3/d > 2$) vede k oddělení jednotlivých cirkulačních smyček a vzniku nemíchaných „mrtvých“ zón mezi nimi. Naopak při vzájemné vzdálenosti míchadel menší než $H_3/d < 0,75$ vznikne v míchané vsádce s axiálními míchadly pouze jedna cirkulační smyčka (viz obr. 10a). V tomto případě je všechna kapalina na výtlačku z horního míchadla nasávána spodním míchadlem a systém se chová jako sériově zapojená čerpadla. Při zvětšení vzdálenosti míchadel v rozmezí $H_3/d = 0,75 \div 1,25$ nastává postupné oddělování cirkulačních smyček s tím, že v místě jejich střetu dochází ke zvýšené disipaci energie (obr. 10b), což má za následek škrcení míchadel a snížení jejich hydraulické účinnosti. Tyto závěry plynou z bezrozměrných čerpacích výkonností míchadel tvořících dvě uspořádání etažových míchadel uvedených v tab. 3 (Jirout, 2013).

Tabulka 3. Bezrozměrné čerpací výkonnosti míchadel pracujících na společném hřídeli – válcová nádoba s klenutým dnem a čtyřmi radiálními narážkami, $D/d = 3$ (Jirout, 2013).

		$N_{Qp(ax.)}$			
		Etažové míchadlo I		Etažové míchadlo II	
		dolní	horní	dolní	horní
H_2/d	H_3/d	6SL	6SL	6SL	3SL45
0,5	0,5	0,71	0,74	0,71	0,68
0,5	0,75	0,69	0,69	0,69	0,61
0,5	1	0,69	0,54	0,69	0,46
0,5	1,25	0,64	0,51	0,65	0,42

3. Homogenizační účinky míchadel

3.1. Homogenizace v míchané vsádce

Teoretický popis průběhu homogenizace by vyžadoval simultánní řešení Navier-Stokesovy a základní rovnice pro přenos hmoty. Při míchání vzájemně mísitelných kapalin je řídícím dějem zpravidla konvektivní a turbulentní difúze. Molekulární difúze v kapalinách je relativně pomalá a v míchaných systémech s dobrou cirkulací je obvykle možno její vliv zanedbat. Na základě inspekční analýzy (Rieger a kol., 2005) výše popsaných rovnic platí pro geometricky podobná míchací zařízení, že při

konstantním stupni homogenity míchané vsádky závisí bezrozměrná doba homogenizace na modifikovaném Reynoldsově čísle Re používaném v teorii míchání

$$nt = f(Re). \quad (18)$$

V oblasti plouživého proudění, resp. při plně vyvinuté turbulenci, přejde rov. (18) na tvar

$$nt = konst. \quad (19)$$

K homogenizaci míchané vsádky dochází vlivem cirkulačního proudění. Potřebný počet cirkulací i závisí na požadovaném stupni homogenity. Doba homogenizace je tedy možné vyjádřit jako součin potřebného počtu cirkulací a doby cirkulace

$$t = it_c, \quad (20)$$

resp. v bezrozměrné formě

$$nt = i nt_c. \quad (21)$$

Počet cirkulací míchané vsádky potřebných pro dosažení požadovaného stupně homogenity je možné vyjádřit v turbulentní oblasti proudění při znalosti celkového bezrozměrného průtoku v míchané vsádce N_{QT} a bezrozměrné doby homogenizace nt ve tvaru (Fořt a kol., 2001)

$$i = \frac{4}{\pi}(nt)N_{QT}\left(\frac{d}{D}\right)^3. \quad (22)$$

Při výběru vhodného typu míchadla je třeba přihlížet nejen k příkonu, ale i k době homogenizace. Míchadlo s malým příkonem, které vykazuje dlouhou dobu homogenizace, může být stejně nevhodné jako míchadlo, které zhomogenizuje míchanou vsádku ve velmi krátké době, ale při neúměrně velkém příkonu. Z toho vyplývá, že při porovnávání různých typů míchadel je třeba vycházet z energie potřebné pro dosažení požadovaného stupně homogenity. V oblasti turbulentního proudění je možné dle (Rieger a kol., 2005) vyjádřit tuto energii při znalosti příkonového čísla míchadla Po v bezrozměrném tvaru

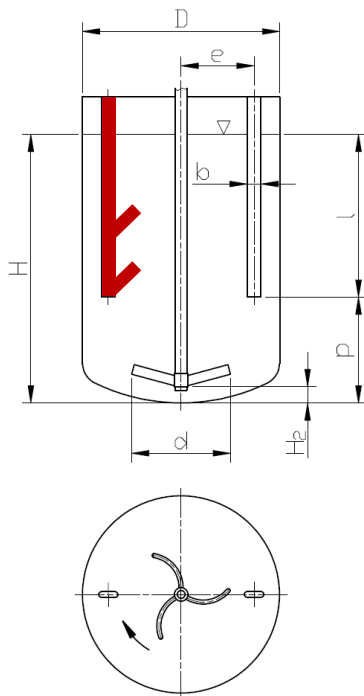
$$E = \frac{Pt^3}{\rho D^5} = Po(nt)^3\left(\frac{d}{D}\right)^5. \quad (23)$$

Při experimentálním stanovování doby míchání potřebné pro homogenizaci míchané vsádky se používá celá řada metod určení stupně homogenity (odbarvovací, vodivostní). Podrobný přehled principů těchto metod je souhrnně uveden v (Paul a kol., 2003). Takto získané doby homogenizace se vyhodnocují ve tvaru bezrozměrné homogenizační charakteristiky dle rov. (18), resp. (19) ve shodě s (Kramers a kol., 1953; Procházka a Landau, 1961; Khang a Levenspiel, 1976).

3.2. Geometrická konfigurace míchacího zařízení

3.2.1. Použití narážek ve válcové nádobě

Jak již bylo uvedeno, instalace vestaveb do válcové nádoby v podobě narážek má významný vliv na charakter proudění v míchané vsádce. Posílení axiálního toku v míchané vsádce má za následek výrazné zkrácení doby homogenizace. Z porovnání doby homogenizace a zejména energie potřebné pro dosažení požadovaného stupně homogenity míchané vsádky uvedené v tab. 4 pro míchadla se zakřivenými lopatkami (obr. 11) je zřejmé, že použití narážek (radiálních i speciálních prstových – obr. 11) snižuje energetickou náročnost procesu i o několik řádů. V případě nádoby bez narážek je energeticky výhodnější použít míchadla větších průměrů.



Obr. 11. Válcová nádoba s klenutým dnem vybavená prstovými nebo radiálními narážkami a míchadlem se zakřivenými lopatkami.

3.2.2. Tvar lopatek a geometrická konfigurace míchadla

K homogenizaci míchané vsádky dochází cirkulačním prouděním vyvolaném čerpacími účinky míchadel, které závisí na tvaru lopatek a geometrické konfiguraci míchadla. Hydraulické charakteristiky míchadel (tab. 1 a 2) byly doplněny experimentálně stanovenými homogenizačními charakteristikami různých typů a konfigurací míchadel uvedených v tab. 5. Pro dosažení požadovaného stupně homogenity mají radiální míchadla (tab. 4, tab. 5 – míchadlo RT) vyšší energetickou náročnost oproti axiálním míchadlům. Z porovnání energetických nároků pro homogenizaci míchané vsádky vykazují hydrodynamicky optimalizovaná míchadla při zachování stejných geometrických parametrů nižší energetické nároky oproti míchadlům se skloněnými lopatkami. Významný vliv na energetickou náročnost má relativní průměr míchadla D/d i jeho relativní výška nade dnem H_2/d . Tyto parametry ovlivňují čerpací a cirkulační účinky míchadel.

Z vyhodnocení homogenizačních měření s uvažováním čerpacích a cirkulačních účinků míchadel (Fořt a kol., 2001; Fořt a Jirout, 2011) plyne, že počet cirkulací míchané vsádky potřebných pro dosažení 98 % homogenity je pro všechna proměřovaná axiální míchadla ve válcové nádobě s radiálními narážkami $i = 3 \div 4$. Navíc byl tento rozsáhlý soubor homogenizačních charakteristik míchadel v turbulentní oblasti proudění vyhodnocen spolu s příkonovými charakteristikami ve tvaru

$$Po^{\frac{1}{3}} nt \left(\frac{d}{D} \right)^2 = K. \quad (24)$$

Pro všechny proměřované konfigurace oscilovala hodnota konstanty K v rov. (24) kolem hodnoty **5,2** se směrodatnou odchylkou $\pm 10\%$, což potvrdilo přístup publikovaný v (Grenville a Nienow, 2003). Z tohoto přístupu plyne, že je možné bezrozměrnou dobu homogenizace v turbulentní oblasti proudění ve válcové nádobě s radiálními narážkami přibližně stanovit při znalosti příkonového čísla Po použitého míchadla dle rov. (24).

Tabulka 4. Homogenizační účinky třílopatkových (radiálních) míchadel se zakřivenými lopatkami ve válcové nádobě s klenutým dnem. (BN – bez narážek, RN – modifikovaní radiální narážky, PN – prstové narážky).

	D/d	h/d	t/d	nt	Po	E
BN	1,5	0,1	0,03	$144,1 \pm 12,6$	$0,19 \pm 0,002$	75626
	1,5	0,15	0,03	$95,3 \pm 2,7$	$0,26 \pm 0,002$	29275
	1,5	0,15	0,07	$136,5 \pm 6,7$	$0,22 \pm 0,004$	73376
	2	0,1	0,03	$385,6 \pm 84,2$	$0,25 \pm 0,003$	450357
	2	0,12	0,03	338,8	$0,30 \pm 0,007$	359213
	2	0,15	0,03	287,7	$0,30 \pm 0,003$	225891
	2	0,15	0,07	$318,1 \pm 53,6$	$0,27 \pm 0,006$	275229
	2	0,2	0,03	164,5	$0,35 \pm 0,004$	48498
RN	1,5	0,1	0,03	$27,0 \pm 1,6$	$0,29 \pm 0,01$	750
	1,5	0,15	0,03	$20,7 \pm 0,9$	$0,46 \pm 0,03$	538
	1,5	0,15	0,07	$23,7 \pm 1,3$	$0,36 \pm 0,02$	627
	2	0,1	0,03	$40,6 \pm 2,8$	$0,25 \pm 0,04$	513
	2	0,12	0,03	$38,8 \pm 3,8$	$0,32 \pm 0,04$	589
	2	0,15	0,03	$35,2 \pm 2,7$	$0,39 \pm 0,05$	525
	2	0,15	0,07	$37,9 \pm 3,2$	$0,35 \pm 0,03$	590
	2	0,2	0,03	$31,9 \pm 1,8$	$0,53 \pm 0,04$	539
PN	2	0,15	0,03	$39,0 \pm 2,5$	$0,57 \pm 0,06$	1057

Tabulka 5. Homogenizační účinky míchadel ve válcové nádobě s radiálními narážkami (Fořt a kol, 2001; Rieger a kol 2005; Fořt a Jirout, 2011; Rieger a kol. 2013).

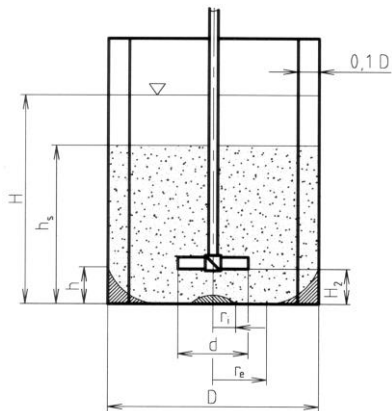
Míchadlo	D/d	H_2/d	nt	Po	E
TX 335	3	0,75	$44,7 \pm 1,5$	$0,905 \pm 0,012$	333
TX 445	3	0,75	$45,9 \pm 1,4$	$0,900 \pm 0,011$	358
TX 535	3	0,75	$51,7 \pm 1,4$	$0,646 \pm 0,009$	367
RT	3,3	1	51,8	5,099	1811
6SL	3,3	1	53,1	1,702	651
3SL45	3,3	1	60,5	1,1	622
3SL24	2	1	37,8	0,39	430
3SL24	3	1	60,3	0,34	367
3SL24	4,5	1	142	0,29	450
3SL35	2	1	25,3	0,8	403
3SL35	3	1	58,7	0,69	572
3SL45	2	1	18,6	1,23	236
3SL45	3	1	42,3	1,06	329
3SL45	3	0,75	51,8	1,11	633
3SL45	3	0,5	55,3	1,19	824
3SL45	3	0,33	54,5	1,29	858
3SL45	4,5	1	112	0,92	697
6SL	3	0,75	$39,05 \pm 2,3$	1,65	404
4SL	3	0,75	$46,5 \pm 1,5$	1,29	534
4RLLN	3	0,75	$55,5 \pm 4$	0,59	414

4. Suspendační účinky míchadel

4.1. Popis průběhu suspendace

Popisem průběhu suspendace částic těžších než kapalina se rozumí sledování uspořádání vrstvy nesuspendovaných částic na dně nádoby a také rozhraní mraku suspendovaných částic a čisté kapaliny v míchané vsádce charakterizované jeho výškou h_s v závislosti na frekvenci otáčení míchadla. V průběhu zvyšování otáček míchadla se částice dostávají do vznosu postupně. Na dně nádoby se vytvoří prstenec bez usazených částic oddělující vrstvu částic usazených pod míchadlem charakterizovanou jejím poloměrem r_i a vrstvu částic usazených u stěny o poloměru r_e a výšce u stěny h . Při dalším zvyšování frekvence otáčení míchadla se prstenec vyčištěného dna dále zvětšuje, až v okamžiku vznosu všech částic je poloměr vrstvy částic usazených na dně pod míchadlem roven nule $r_i = 0$ a poloměr vrstvy částic usazených na dně u stěny je roven polovině průměru nádoby $r_e = D/2$ resp. výška této vrstvy u stěny nádoby je také nulová $h = 0$.

Při vznosu je veškerá pevná fáze rozptýlena v kapalině, avšak s nerovnoměrnou lokální koncentrací, která klesá směrem k hladině. Při dalším zvyšování frekvence otáčení se postupně zvyšuje homogenita suspenze. Maximální frekvence otáčení míchadla je pak zpravidla omezena strháváním vzduchu z prostoru nad hladinou do míchané vsádky. Tyto sledované parametry jsou znázorněny na obr. 1.



Obr. 12. *Uspořádání vrstvy částic usazených na dně míchané nádoby a rozhraní mezi vytvořenou suspenzí a čistou kapalinou v míchané vsádce.*

Částice nacházející se těsně před vznosem z vrstvy usazených částic na dně tj. $z = 0$ ($r = r_i$, $r = r_e$) resp. $z = h$ ($r = D/2$) a částice nacházející se v úvratí na rozhraní mraku vytvořené suspenze a čisté kapaliny tj. $z = h_s$ mají nulovou rychlost. Vertikální složka síly, kterou působí kapalina na tyto částice, je pak v rovnováze s tíhovou silou zmenšenou o sílu vzlakovou.

Pro geometricky podobná míchací zařízení lze inspekční analýzou (Jirout a Rieger, 2002) základních hydrodynamických rovnic v bezrozměrném tvaru společně se silovou rovnováhou s ohledem na počet částic a s uvažováním podmínek pro bezrozměrné souřadnice hranice vrstvy sedimentovaných částic resp. vytvořené suspenze dojít k následujícím závěrům:

$$\frac{2r_i}{D} = f\left(Fr', Re, \frac{d_p}{D}, c_v\right), \quad \frac{2r_e}{D} = f\left(Fr', Re, \frac{d_p}{D}, c_v\right) \quad (25, 26)$$

a

$$\frac{h}{H} = f\left(Fr', Re, \frac{d_p}{D}, c_v\right), \quad \frac{h_s}{H} = f\left(Fr', Re, \frac{d_p}{D}, c_v\right) \quad (27, 28)$$

V oblasti *velkých* hodnot modifikovaného Reynoldsova čísla lze zanedbat vliv vazkých sil a uspořádání vrstvy částic a suspenze dle rov. (25 – 28) již nebude funkcí modifikovaného Reynoldsova čísla Re .

4.2. Vznos pevné fáze

Vznos pevné fáze se definuje jako stav, kdy jsou všechny pevné částice rozptýleny v míchané kapalině, tzn. žádné částice nezůstávají na dně nádoby a všechny jsou zcela obtékány kapalinou (Zwietering, 1958). Tím je dosaženo maximální mezifázové plochy, což je žádoucí např. při přenosu hmoty. Frekvence otáčení míchadla potřebná pro dosažení stavu vznosu se nazývá *otáčky vznosu*.

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 vztahovou. Pro geometricky podobná míchací zařízení lze inspekční analýzou dle (Rieger a Dítl, 2000) základních hydrodynamických rovnic v bezrozměrném tvaru, společně s touto silovou bilancí, s ohledem na počet částic při stavu vznosu částic, dojít k závěru:

$$Fr' = \frac{\rho n_{cr}^2 d}{g \Delta \rho} = f \left(Re, \frac{d_p}{D}, c_v \right) \quad (29)$$

V oblasti *velkých* hodnot modifikovaného Reynoldsova čísla lze zanedbat vliv vazkých sil, a proto lze uvažovat, že kapalina na částice působí pouze silou dynamického tlaku. V turbulentní oblasti proudění pak rov. (29) přejde do tvaru:

$$Fr' = f \left(\frac{d_p}{D}, c_v \right) \quad (30)$$

Závislost modifikovaného Froudova Fr' čísla na bezrozměrné velikosti částic d_p/D a střední objemové koncentraci pevné fáze c_v dle rov. (30) 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. V práci (Rieger a Dítl, 2000) bylo ukázáno, že suspendační charakteristiky lze pro jednotlivé objemové koncentrace pevné fáze vyjádřit mocninovou závislostí

$$Fr' = C_i \left(\frac{d_p}{D} \right)^{\gamma_i} \quad (31)$$

s koeficienty C_1 a γ_1 pro relativně malé částice, resp. C_2 a γ_2 pro částice relativně větší.

Koeficienty C_i a γ_i korelace (31) vyjadřující suspendační charakteristiku míchadla závisí na střední objemové koncentraci pevné fáze

c_v . Matematický popis této závislosti navrhl a ověřil na experimentálních datech (Rieger, 2000) ve tvaru

$$C_i = A_i \exp(B_i c_v) \quad (32a)$$

a

$$\gamma_i = \alpha_i + \beta_i c_v. \quad (32b)$$

Frekvence otáčení míchadla potřebná pro dosažení vznosu pevné fáze, tj. minimální otáčky míchadla v provozních zařízeních pro míchání suspenzí, je možné stanovit výpočtem z rovnice (31), což potvrzují i výsledky scale-up dle (Jirout a Rieger, 2009). Hodnoty koeficientů v rovnici (31) resp. (32) stanovené experimentálně na geometricky podobných modelových míchacích zařízeních pro různé geometrické konfigurace míchadel jsou uvedeny např. v (Jirout a Rieger, 2011).

Suspendační účinnost míchadel je posuzována na základě příkonu míchadla potřebného k uvedení částic do vznosu. Pro tento účel navrhl (Rieger, 1993) bezrozměrné kritérium, které vznikne vyloučením frekvence otáčení míchadla při stavu vznosu a průměru míchadla z již výše definovaných bezrozměrných kritérií modifikovaného Froudova čísla Fr' a příkonového čísla Po ve tvaru

$$\pi_s = \frac{P}{\rho_{su}} \left(\frac{\rho}{g\Delta\rho} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{D} \right)^{\frac{7}{2}} = Po \cdot (Fr')^{\frac{3}{2}} \cdot \left(\frac{d}{D} \right)^{\frac{7}{2}}. \quad (33)$$

4.3. Geometrická konfigurace zařízení pro míchání suspenzí částic těžších než kapalina

Podrobná analýza optimalizace geometrické konfigurace zařízení pro míchání částic těžších než kapalina je uvedena v souhrnné práci (Jirout, 2007), která rozšiřuje práci (Kasat a Pandit, 2005), a proto budou dále uvedeny jen souhrnné závěry doplněné o nejnovější výsledky.

4.3.1. 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 se dnem kuželovým opatřeným výpustním hrdlem. Tlakové aparáty jsou zpravidla vždy z pevnostního hlediska tvořeny válcovou nádobou s klenutým dnem.

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 (Jirout a Rieger, 1999; Moravec a kol., 2006).

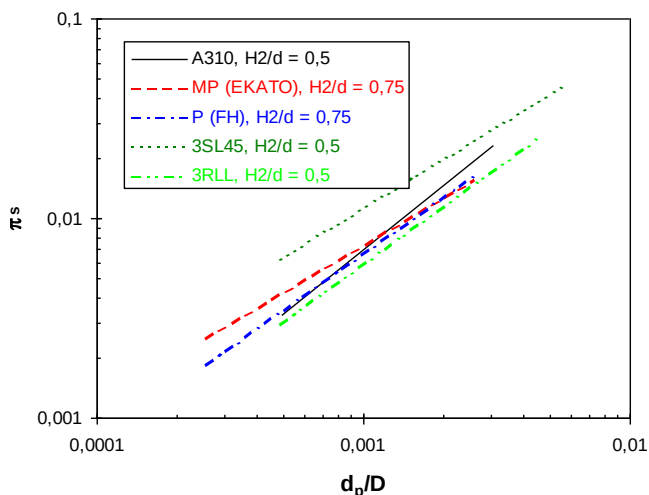
4.3.2. Použití narážek ve válcové nádobě

Při míchání ve válcových nádobách s rovným i klenutým dnem má na charakter toku míchané vsádky a tím i na suspendaci částic vliv použití vestaveb v nádobě v podobě různě tvarovaných a umístěných narážek. V případě míchání v nádobě bez narážek v oblasti turbulentního proudění míchaná vsádka v nádobě proudí převážně v tangenciálním směru a vrstva částic sedimentovaných na dně aparátu pouze rotuje a nedochází k její homogenizaci v celém objemu. Z těchto důvodů je nutné instalovat narážky do nádoby a tím posílit axiální tok suspenze, čímž je dosaženo její lepší homogenity. V současné době se používají různé typy, tvary a umístění narážek v nádobě v závislosti na konstrukci aparátu (např. ploché radiální, šípové, trubkové, prstové). Úpravou tvaru a polohy umístění narážek 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).

4.3.3. Tvar lopatek a geometrická konfigurace míchadla

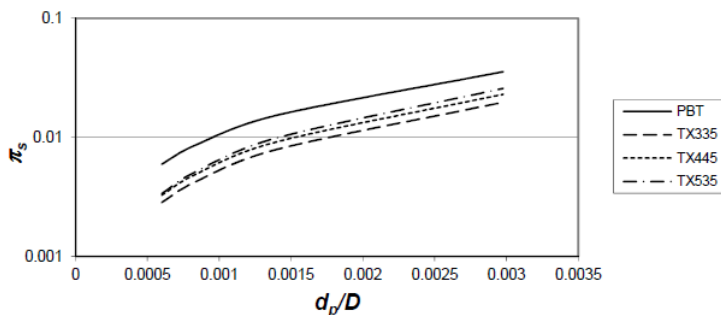
Volba typu a geometrického uspořádání rotačního míchadla ovlivňuje nejen průběh suspendace částic, ale hlavně i energii potřebnou na suspendaci pevné fáze. Pro míchání suspenzí se nejčastěji používají rychloběžná míchadla různé konstrukce vyvolávající v nádobě převážně axiální proudění vsádky. Na základě mnoha experimentů (Jirout, 2007) lze shrnout, že z hlediska příkonu míchadla potřebného pro dosažení stavu vznosu je vhodné použít axiální míchadla čerpající kapalinu směrem ke dnu nádoby. Optimální výška spodní hrany lopatek axiálních míchadel nade dnem nádoby v rozmezí od jedné třetiny až do tří čtvrtin průměru míchadla $H_2/d = 1/3 \div 3/4$ a optimální poměr průměru nádoby k průměru míchadla se pohybuje kolem hodnoty $D/d = 3$. V některých speciálních konstrukcích míchacích zařízení (např. smaltované aparáty) se používají pro suspendaci i radiální míchadla. Energeticky i konstrukčně jsou výhodná pro tyto aparáty třílopatková míchadla se zakřivenými lopatkami v konfiguraci dle obr. 11,

avšak v těchto případech je třeba věnovat zvýšenou pozornost vhodnému použití narážek, které alespoň částečně usměrní tok v axiálním směru.

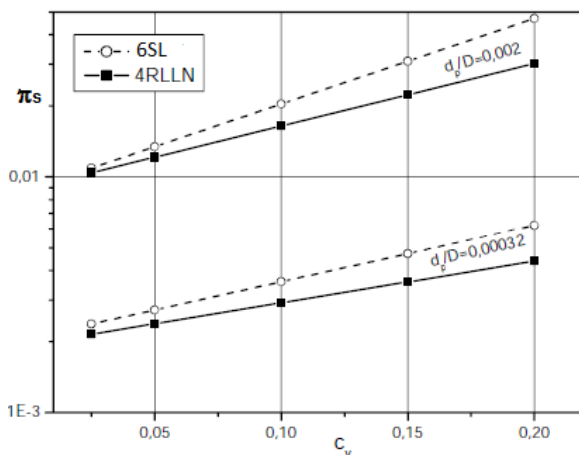


Obr. 13. Závislost bezrozměrného příkonu potřebného k uvedení částic do vznosu axiálních míchadel na bezrozměrném průměru částic d_p/D pro střední objemovou koncentraci pevné fáze $c_v = 10 \%$ (Jirout a Rieger, 2011).

Z porovnání suspenzační účinnosti velkého množství axiálních míchadel znázorněného na obr. 13, 14 a 15 plyne, že všechna míchadla s tvarovanými lopatkami mají výrazně menší energetické nároky na suspenzaci než standardní míchadla se skloněnými lopatkami. Všechna hydrodynamicky optimalizovaná míchadla (s lomenými i velkoplošnými lopatkami) vykazují prakticky stejnou suspenzační účinnost, jsou-li porovnávána pro jejich energeticky optimální výšku nade dnem. Navíc 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, přičemž prakticky nezáleží na počtu lopatek tohoto míchadla.



Obr. 14. Závislost bezrozměrného příkonu potřebného k uvedení částic do vznosu hydrodynamicky optimalizovaných míchadel TECHMIX na bezrozměrném průměru částic d_p/D pro střední objemovou koncentraci pevné fáze $c_v = 15 \%$ (Rieger a kol., 2013).



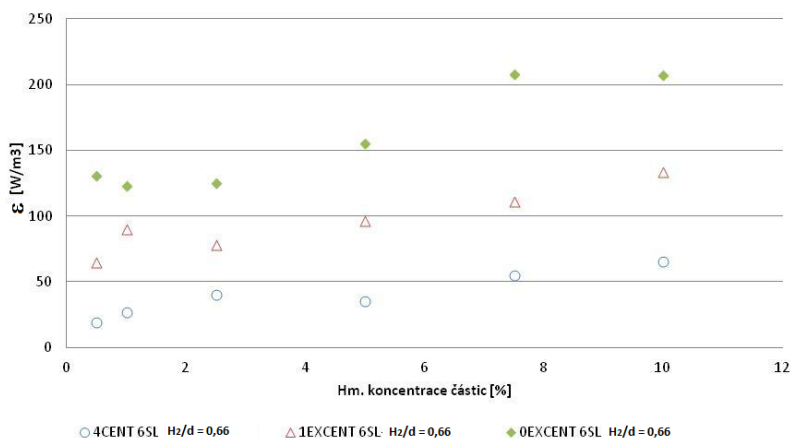
Obr. 15. Závislost bezrozměrného příkonu potřebného k uvedení částic do vznosu axiálního míchadla s velkoplošnými lomenými lopatkami (Jirout a Rieger, 2012; Rieger a kol., 2013).

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. 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. $H_3/d = 1,25$, což koresponduje se závěry uvedenými v kap. 2.5. Zároveň příkon těchto etážových míchadel prakticky nezávisí na počtu jejich lopatek (Jirout a kol., 2006).

4.4. Geometrická konfigurace zařízení pro míchání suspenzí částic lehčích než kapalina

V průmyslu se vyskytují suspenze částic lehčích než kapalina (např. zpracování kalů, fermentační procesy, výroba barviv, papíru, celulózy, prášků, potravin, polymerizační reakce). Pro míchání těchto suspenzí jsou v průmyslu užívány různé konfigurace míchacích zařízení s axiálním míchadlem.



Obr. 16. Porovnání příkonu potřebného pro stržení a homogenizaci částic plovoucích na hladině pro energeticky nejvýhodnější konfigurace míchacího zařízení (Svačina a Jirout, 2012).

V práci (Svačina a Jirout, 2012) byly testovány tři běžně doporučené konfigurace těchto zařízení – nádoba se čtyřmi radiálními narážkami (4CENT), nádoba s jednou narážkou umístěnou proti excentricky umístěnému míchadlu (1EXCENT) a nádoba bez narážek s excentricky umístěným míchadlem (0EXCENT). Zařízení byla vybavena standardními míchadly se skloněnými lopatkami i axiálními hydrodynamicky optimalizovanými míchadly čerpajícími ke dnu nádoby nebo hladině. Z porovnání konfigurací znázorněných na obr. 16 je zřejmé, že nejnižší příkon potřebný pro suspendaci plovoucích částic, tj. strhnutí částic z hladiny a jejich homogenizace, je dosaženo v nádobě se čtyřmi radiálními narážkami a centricky umístěným axiálním míchadlem čerpajícím směrem

k hladině a umístěným třetinu průměru míchadla pod hladinou, tj. $H_2/d = 2/3$. Tyto závěry korespondují s výsledky uvedenými v (Karcz a Mackiewicz, 2006). Analogicky k míchání částic těžších než kapalina jsou energeticky nejvýhodnější míchadla s tvarovanými lopatkami pracující ve výše uvedené konfiguraci.

4.5. Geometrická konfigurace zařízení pro míchání heterogenních suspenzí

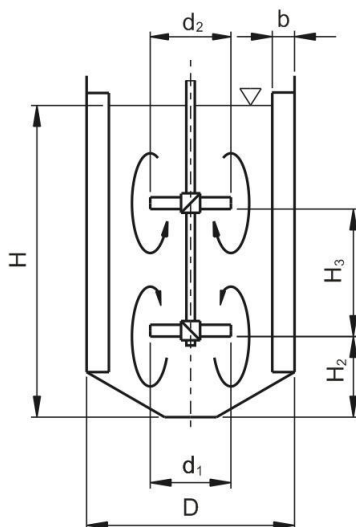
Při míchání reálných látek se v průmyslu setkáváme s heterogenními suspenzemi tvořenými částicemi různé velikosti i složení (kaly a substráty v biotechnologických procesech – obr. 17), což je třeba zohlednit při volbě vhodné geometrie systému a stanovení otáček a příkonu míchadla.

V případě heterogenních suspenzí tvořených částicemi stejné či podobné hustoty, avšak *rozdílné velikosti částic*, bylo na základě experimentů ukázáno, že při stanovení frekvence otáčení míchadla potřebné pro uvedení částic do vzhledu je možné vyházet z velikosti a koncentrace částic největší frakce pevné fáze. Energeticky optimální konfigurace míchacích zařízení pro tyto suspenze je pak možné volit dle doporučení v kap. 4.3.

Složitější situace nastává při míchání heterogenních suspenzí tvořených částicemi různé velikosti i složení, obzvláště suspenzí obsahující současně *částice lehčí i těžší než kapalina*. V takovémto případě je třeba zajistit, aby částice těžší než kapalina byly uvedeny do vzhledu, částice lehčí než kapalina byly strhnuty z hladiny a současně aby byla suspenze homogenizována rovnoměrně v celém objemu. Experimentálně byla testována celá řada konfigurací míchacích zařízení lišících se umístěním, typem a tvarem lopatek míchadla, směrem čerpání kapaliny i použitím etážových míchadel. Při použití samostatně pracujícího míchadla čerpajícího kapalinu směrem ke dnu dle konfigurace doporučené v kap. 4.3, byl sice zajištěn vzhled částic těžších než kapalina, avšak částice z hladiny byly strhávány velmi obtížně a až po dosažení vysokých otáček. V případě čerpání míchadla směrem k hladině dle konfigurace doporučené dle kap. 4.4 nastala situace opačná. V obou případech nebyla zajištěna homogenita suspenze, neboť těžší částice se držely ve spodní části míchané vsádky a lehčí zase v blízkosti hladiny. Z tohoto důvodu bylo navrženo (Jirout a Rieger, 2013) použití etážového míchadla, kdy spodní míchadlo čerpá ke dnu a zajišťuje vzhled těžších částic a horní míchadlo čerpá směrem k hladině a tím strhává plovoucí částice. Díky přenosu hybnosti mezi dolní a horní cirkulační smyčkou dochází k homogenizaci těžších i lehčích částic v celém objemu. Navíc tato konfigurace vykazuje minimální energetické nároky na suspendaci a homogenizaci vsádky, která je $5 \div 10$ x nižší než u výše uvedených standardních uspořádání. Schéma navržené konfigurace zařízení je znázorněno na obr. 18.



Obr. 17. Substrát v míchaném fermentoru při výrobě bioplynu.



Obr. 18. Doporučená konfigurace míchacího zařízení pro homogenizaci heterogenních suspenzí (Jirout a Rieger, 2013).

4.6. Geometrická konfigurace zařízení pro míchání jemnozrnných koncentrovaných suspenzí

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 nelineární chování. Při míchání nelineárních 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 promíchávané kaverny. Postupem stanovení velikosti míchané kaverny je věnována pozornost např. v (Wichterle a Wein, 1981). Návrhovým parametrem míchacích zařízení pro míchání takových suspenzí je tedy dosažení cirkulace suspenze v celé vsádce, čehož lze dosáhnout vhodnou geometrickou konfigurací míchacího zařízení.

Z experimentů testujících celou řadu pomaloběžných i rychloběžných míchadel (šroubové míchadlo s usměrňovacím válcem, axiální míchadla, různé varianty a uspořádání etážových míchadel) a jejich konfigurací uvedených v (Moravec a kol., 2009) se ukázalo, že pro zajištění cirkulace míchané vsádky při míchání koncentrovaných nelineárních suspenzí jsou

nejvýhodnější etážová míchadla větších průměrů (obr. 10). 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. Speciální aspekty konstrukce míchacích zařízení

Při navrhování míchacích zařízení je třeba volit konfiguraci zařízení nejen s ohledem na minimalizaci provozních nákladů, ale je třeba zohlednit volbu tvaru a materiálu funkčních částí zařízení (míchadlo, hřídel a nádoba) i z hlediska jejich pevnostních charakteristik, odolnosti proti korozi a mechanickému opotřebení. V chemickém, potravinářském a farmaceutickém průmyslu jsou zařízení často vystavena působení agresivního prostředí, kdy je třeba k ochraně proti korozi a opotřebení volit vhodnou povrchovou úpravu, např. smaltováním. Z hlediska strojírenské výroby takového zařízení je pak třeba počítat s úpravou geometrie funkčních částí zařízení. (nutnost odstranění všech ostrých přechodů a hran pozvolným zaoblením v případě smaltování – obr. 19). Tyto zásahy do konstrukce zařízení značně ovlivňují charakter a intenzitu proudění v míchané vsádce a tím i procesy v ní probíhající. Při porovnání energetických nároků na homogenizaci a suspendaci vykazují zaoblená míchadla $2 \div 3$ x vyšší energetické nároky oproti nezaobleným míchadlům. S tímto faktem je třeba počítat při návrhu např. smaltovaných aparátů a není možné použít procesní charakteristiky míchadel bez zaoblení hran pro výpočet otáček a příkonu smaltovaných zaoblených míchadel.

V případě, že se neprovede žádná úprava zařízení z hlediska koroze a mechanického opotřebením je třeba počítat s tím, že vlivem působení prostředí na lopatky míchadla dojde k jejich tvarovému nebo plošnému opotřebení. Tvarové opotřebením lopatek míchadla má za následek změnu geometrického tvaru míchadla, v jehož důsledku dochází k poklesu jeho



Obr. 19. Smaltované etážové míchadlo firmy Tenez a.s.

čerpací výkonnosti a tím i ke změně dalších procesních charakteristik (Fořt a Jirout, 2011), což může vést ke zhoršení kvality produktu. Plošné opotřebení lopatek míchadla má za následek zmenšování jejich tloušťky a tím i jejich pevnosti. V extrémním případě může dojít i k jejich zničení, což má za následek odstavení míchacího zařízení a následné náklady na jeho údržbu a výměnu míchadla.

6. Závěr

Z hlediska účelu míchání jsou nejčastější požadavky na homogenizaci míchané vsádky a zajištění suspendace částic. Tyto operace jsou citlivé na hydrodynamické poměry v míchané vsádce, což z hlediska stavby zařízení nebylo doposud uceleně řešeno. Na základě rozsáhlého souboru vlastních experimentů bylo ukázáno, jak proudění v míchané vsádce vyvolané čerpacími a cirkulačními účinky míchadel ovlivňuje parametry a energetickou účinnost těchto procesů v závislosti na geometrické konfiguraci míchacích zařízení. Takto komplexní pohled umožňuje optimalizaci konstrukce a uspořádání míchacích zařízení.

- Tvar rychlostního profilu na výtoku z hydrodynamicky optimalizovaných (hydrofoil) míchadel, usměrněný tok vsádky ve válcové nádobě vybavené radiálními narážkami a jejich vysoká hydraulická účinnost předurčuje tato míchadla pro zvýšení efektivity procesů homogenizace a suspendace.
- Následné experimenty potvrdily energetickou výhodnost použití hydrofoil míchadel pro homogenizaci míchané vsádky i míchání suspenzí oproti míchadlům se skloněnými lopatkami.
- Pro míchání suspenzí částic těžších než kapalina je výhodné, aby tato míchadla byla umístěna v nádobě s radiálními narážkami nade dnem a čerpala směrem ke dnu. Naopak pro míchání suspenzí částic lehčích než kapalina je třeba, aby míchadla byla umístěna pod hladinou a čerpala směrem k hladině.
- Při míchání koncentrovaných, jemnozrnných nebo heterogenních suspenzí je z hlediska zajištění požadované homogenity suspenze a energetické náročnosti procesu vhodné do válcové nádoby s narážkami instalovat etážové míchadlo zajišťující potřebné proudění a cirkulaci v celém objemu míchané vsádky.
- V případech, kdy je třeba upravit tvar lopatek, např. zaoblením pro smaltovaná míchadla anebo v případech, kdy dochází ke změně tvaru lopatek jejich opotřebením, je třeba mít na zřeteli, že tato změna tvaru lopatek znatelně ovlivní hydrodynamické parametry míchadel a tím i procesy probíhající v míchané vsádce.

Uvedené závěry byly autorem využity při návrhu a realizaci více než 25 průmyslových míchacích zařízení.

Seznam symbolů

A_i, B_i	konstanty v rov. (32a)	[1]
b	šířka narážek	[m]
C_i	koefficient v rov. (31)	[1]
c_v	střední objemová koncentrace pevné fáze	[1]
D	průměr nádoby	[m]
d	průměr míchadla	[m]
d_p	střední objemový průměr částic	[m]
	energetické kritérium čerpací účinnosti míchadla	
E_p	$E_p = \frac{N_{QP}^3}{Po}$	[1]
	energetické kritérium celkové cirkulační účinnosti	
E_T	míchadla $E_p = \frac{N_{QT}^3}{Po}$	
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	výška vrstvy částic usazených u stěny nádoby	[m]
h	šířka lopatky míchadla	[m]
h_s	výška rozhraní mraku suspendovaných částic a čisté kapaliny	[m]
i	počet cirkulací v míchané vsádce	[1]
N_{Qi}	bezrozměrný indukovaný průtok $N_{Qi} = \frac{Q_i}{nd^3}$	[1]
N_{QP}	průtokové číslo $N_{QP} = \frac{Q_p}{nd^3}$	[1]
N_{QT}	bezrozměrný úhrnný průtok $N_{QT} = \frac{Q_p}{nd^3}$	[1]
n	frekvence otáčení míchadla	[s ⁻¹]
nt	Bezrozměrná doba homogenizace	[1]
n_{cr}	frekvence otáčení míchadla potřebná pro dosažení vznosu částic	[s ⁻¹]
P	příkon míchadla	[W]
Po	příkonové číslo $Po = \frac{P}{\rho n^3 d^5}$	[1]

p	tlak	[Pa]
Q_i	indukovaný průtok v míchané vsádce	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
Q_P	čerpací výkonnost míchadla	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
Q_T	Úhrnný průtok míchané vsádky	$[\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}]$
Re	modifikované Reynoldsovo číslo $Re = \frac{nd^2\rho}{\mu}$	[1]
r	Poloměr – radiální souřadnice	[m]
r_i	poloměr vrstvy částic usazených na dně pod míchadlem	[m]
r_e	poloměr vrstvy částic usazených na dně u stěny	[m]
S	plocha	$[\text{m}^2]$
t	čas, doba homogenizace	[s]
u	rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
$\vec{u}$	vektor rychlosti	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
x	souřadnice	[m]
$\vec{x}$	polohový vektor	[m]
z	axiální souřadnice	[m]
α_i, β_i	konstanty v rov. (32b)	[1]
γ_i	koeficient v rov. (31)	[1]
μ	dynamická viskozita bezrozměrný příkon potřebný pro suspendaci	$[\text{Pa} \cdot \text{s}]$
π_s	$\pi_s = \frac{P}{\rho_{su}} \left(\frac{\rho}{g\Delta\rho} \right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{1}{D} \right)^{\frac{7}{2}}$	[1]
ρ	hustota kapaliny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
ρ_{su}	hustota suspenze	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
$\Delta\rho$	rozdíl hustoty pevné fáze a kapaliny	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
<i>Dolní indexy</i>		
$ax.$	axiální složka	
<i>Horní indexy</i>		
$*, +$	bezrozměrné veličiny	

Seznam zkratek

3SL24, 3SL35, 3SL45 – třílopatkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 24^\circ, 35^\circ$ resp. 45°

4SL, 6SL – čtyř resp. šestilopátkové míchadlo s lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 45^\circ$ dle CVS 69 1020

3RLL, 4RLL, 6RLL – tří, čtyř resp. 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)

TX335, TX445, TX535 – axiální hydrofoil míchadla firmy Techmix s.r.o

4RLLN – Axiální míchadlo s velkoplošnými lomenými lopatkami (Jirout a Rieger, 2012)

RT – turbínové míchadlo s dělicím kotoučem

BN – nádoba bez nárážek

RN – nádoba vybavená radiálními nárážkami

PN – nádoba vybavená prstovými nárážkami

Seznam použité literatury

Fořt, I.: *Flow and turbulence in vessels with axial impellers*. Chapter 14 of the Book „Mixing, Theory and Practice, Vol. III (Eds. V. W. Uhl and J. B. Gerry)“, Academic Press, New York, 1986.

Fořt, I., **Jirout, T.**, Rieger, F., Allner, R., Sperling, R.: *Study of the Blending Efficiency of Pitched Blade Impellers*. Acta Polytechnica. 2001, vol. 41, no. 6, p. 7-13.

Fořt, I., Kysela, B., **Jirout, T.**: *Flow characteristics of axial high speed impellers*. Chemical and Process Engineering – Inżynieria Chemiczna i Procesowa. 2010, vol. 31, no. 4, p. 661-679.

Fořt, I., **Jirout, T.**: *A study on blending characteristics of axial flow impellers*. Chemical and Process Engineering - Inżynieria Chemiczna i Procesowa. 2011, vol. 32, no. 4, p. 311-319.

Fořt, I., **Jirout, T.**: *The relation between the rate of erosion wear of pitched blade impeller and its process characteristics*. Chemical Engineering Research and Design. 2011, vol. 89, no. 10, p. 1929-1937.

Gorate, P.R., Beenackers, A. A. C. M., Pandit, A. B.: *Multiple-impeller systems with a special emphasis on bioreactors: a critical review*. Biochemical Engineering Journal. 2000, vol. 6, p. 109-144.

Grenville, R. K., Nienow, A. W. *Blending in miscible liquid*, In: Paul E. L., Otiemo-Obeng V. A., Kresta S. M. (Eds.), *Industrial mixing. Science and practice*. Wiley Interscience, New York. 2003, p. 507 - 542.

- Karcz, J., Mackiewicz, B.: *Suspending of floating solids in an agitated vessel*. Chemical and Process Engineering - Inżynieria Chemiczna i Procesowa. 2006, vol. 27, p. 1517-1533.
- Kasat, G. R., Pandit, A. B.: *Review on Mixing Characteristics in Solid-Liquid and Solid-Liquid-Gas Reactor Vessels*. Can. J. Chem. Eng. 2005, vol. 83, p. 618-643.
- Khang, S.J., Levenspiel, O.: *New scale-up and design criteria for stirrer agitated batch mixing vessels*. Chem. Eng. Sci. 1976, vol. 31, p. 569-677.
- Kramers, H., Baars, G.M., Knoll, W.H.: *A comparative study on the rate of mixing in stirred tanks*. Chem. Eng. Sci. 1953, vol. 2, p. 35-42.
- Kumaresan, T., Joshi, J.B.: *Effect of impeller design of the flow pattern and mixing in stirred tanks*. Chem. Eng. J. 2006, vol. 115, no. 3, p. 173-193.
- Jirout, T., Rieger, F., Jembere, S.:** *Čerpací účinky axiálních míchadel*. In: Zborník príspevkov 6. Medzinárodnej vedeckej konferencie Strojné inžinierstvo. Bratislava: Vydavateľstvo STU, 2002, p. 1-9.
- Jirout, T., Rieger, F.:** *Course of particle suspension with axial-flow impeller*. In: 29th International Conference of Slovak Society of Chemical Engineering [CD-ROM]. Bratislava: Slovenská spoločnosť chemického inžinýrství, 2002, p. 1-8.
- Jirout, T.:** *Míchání suspenzí*. [Doktorská práce (Ph.D.)]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2005. 113 p.
- 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 inžinýrství, 2006, p. 1-8.
- Jirout, T.:** *Suspendace v míchacích zařízeních - optimalizace jejich konstrukčního uspořádání*. [Habilitační přednáška]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2007. 27 p.
- Jirout, T., Rieger, F.:** *Scale-up of Mixing Equipment for Suspensions*. Chemical and Process Engineering - Inżynieria Chemiczna i Procesowa. 2009, vol. 30, no. 3, p. 359-367.
- Jirout, T., Rieger, F.:** *Impeller design for mixing of suspensions*. Chemical Engineering Research and Design. 2011, vol. 89, no. 7A, p. 1144-1151.

- Jirout, T., Rieger, F.:** *Axiální míchadlo s velkoplošnými lomenými lopatkami*. Užiténý vzor Úřad průmyslového vlastnictví, 23644. 2012-04-05.
- Jirout, T.:** *Pumping Capacity of Pitched Blade Multi-Stage Impellers*. Chemical and Process Engineering – Inżynieria Chemiczna i Procesowa. 2013 (v tisku)
- Jirout, T., Rieger, F.:** *Zařízení pro míchání heterogenních suspenzí*. Užiténý vzor Úřad průmyslového vlastnictví – podaná přihláška, 2013.
- Medek, J., Fořt, I.: *Pumping Effect of Impellers with Flat Inclined Blades*. Collect. Czech. Chem. Commun. 1978, vol. 44, p. 3077-3089.
- Medek, J., Fořt, I.: *Efektivnost míchání při sledování objemového průtoku kapaliny míchadlem*. Chem. prům. 1979, vol. 29, no. 3, p. 116-119.
- Moravec, J., **Jirout, T., Rieger, F.:** *Effect of Vessel Bottom Shape on Particle Suspension with High Concentrated Suspensions*. In: Proceedings of the 12th European Conference on Mixing. Milano: AIDIC Servizi S.r.l., 2006, p. 265-272.
- Moravec, J., **Jirout, T., Rieger, F., Krátký, L.:** *Mixing system for highly concentrated fine-grained suspensions*. Polish Journal of Chemical Technology. 2009, vol. 11, no. 4, p. 52-56.
- Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., Kresta, S. M.: *Handbook of industrial mixing: science and practice*. Canada: Wiley-Interscience, 2003, 1377 p.
- Procházka, J., Landau, J.: *Homogenization of miscible liquids by rotary impellers*. Collect. Czech. Chem. Commun., 1961, vol. 26, p. 2961-2974.
- Rieger, F.: *Efficiency of agitators while mixing of suspensions*. In: 6th Polish Seminar on Mixing. Zakopane: Politechnika Kraków, 1993, p. 79-85.
- Rieger, F., Ditl, P.: *Suspension of solid particles*. Chem. Eng. Sci. 1994, vol. 49, no. 14, p. 2219-2227.
- Rieger, F.: *Effect of particle content on agitator speed for off-bottom suspension*. Chem. Eng. J., 2000, vol. 79, p. 171-175.
- Rieger, F., Novák, V., **Jirout, T.:** *Hydromechanické procesy II*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2005. 167 p.
- Rieger, F., **Jirout, T., Kuncewicz, C., Ceres, D.:** *Homogenization and suspension production with a four-blade impeller of a new construction*. PRZEMYSŁ CHEMICZNY. 2013, vol. 92, no. 4, p. 508-511.

- Rieger, F., **Jirout, T.**, Ceres, D., Seichter, P.: *Effect of Impeller Shape on Solid Particle Suspension*. Chemical and Process Engineering - Inżynieria Chemiczna i Procesowa. 2013, vol. 34, no. 1, p. 139-152.
- Seichter, P., Pešl, L.: *Navrhování rotačních míchadel – věda nebo rutina?*. CHEMagazín, 2005, vol. 15, p. 8-11.
- Svačina, O., **Jirout, T.**: *The Effect of the Stirred Vessel Geometry Arrangement on the Drawdown of Floating Particles*. In Procesní a zpracovatelská technika 2012 [CD-ROM]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, 2012, p. 1-16.
- Wichterle, K., Wein, O.: Threshold of mixing on non-Newtonian liquids. *International Chemical Engineering*. 1981, vol. 21, no. 1, p. 116-120.
- 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, vol. 79, p. 177-186.
- Zwietering, T. N.: *Suspending of solid particles in liquid by agitators*. Chem. Eng. Sci. 1958, vol. 8, p. 244 – 253.

Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

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

Vzdělání a profesionální dráha:

- od 2009 **Vedoucí ústavu** – České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky
- od 2008 **Docent** – České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky
- 2008 – 2009 **Zahraniční stáž** – Université de La Rochelle, Francie
- 2008 **Habilitace (Doc.)** – ČVUT v Praze; Obor: *Procesní a konstrukční inženýrství*
- 2002 – 2008 **Odborný asistent** – České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav procesní a zpracovatelské techniky
- 2001 **Zahraniční stáž** – Anhalt University of Applied Sciences / Hochschule Anhalt (FH), Köthen, SRN
- 2000 – 2005 **Postgraduální doktorandské studium (Ph.D.)** – ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Studijní obor: *Procesní technika a zpracovatelské systémy* (udělena Cena rektora ČVUT v Praze)
- 1994 – 2000 **Magisterské studium (Ing.)** – ČVUT v Praze, Fakulta strojní; Studijní obor: *Stroje a zařízení pro chemický, potravinářský a spotřební průmysl*

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

Výuka: *ČVUT v Praze* – Hydromechanické procesy a zařízení, Přenos hybnosti tepla a hmoty, Konstrukční projekty, Experimentální práce, Chemie; *VŠCHT v Praze* – Procesní aparáty a zařízení; *UJEP v Ústí nad Labem* – Průmyslové procesy; *Université de La Rochelle* (Francie, 2008 – 2009) – Desin industriel, Technologie chimique

Členství: Česká společnost chemického inženýrství ČSCHI (od 2003); Pracovní skupina „Míchání“ při ČSCHI – vědecký tajemník (od 2008); Hostující člen Working Party on Mixing of the European Federation of Chemical Engineering (od 2012)

Výsledky ve VaV:

- Autor či spoluautor více než 200 článků v impaktovaných (15) a recenzovaných (30) časopisech, příspěvků ve sbornících mezinárodních a národních konferencí, průmyslových realizací, výsledků s patentovou ochranou, výzkumných a technických zpráv.
- Celkový počet citací v databázi WoS – 37.
- Řešitel, spoluřešitel či spolupracovník 10 externích grantů a výzkumných záměrů.
- Spolupráce v oblasti VaV s více než 25 průmyslovými subjekty.
- **H-index = 3 dle WoS** (30. 8. 2013)