

Míchací zařízení pro míchání vysoce koncentrované jemnozrnné suspenze

Lukáš Krátký, Ing. Jiří Moravec

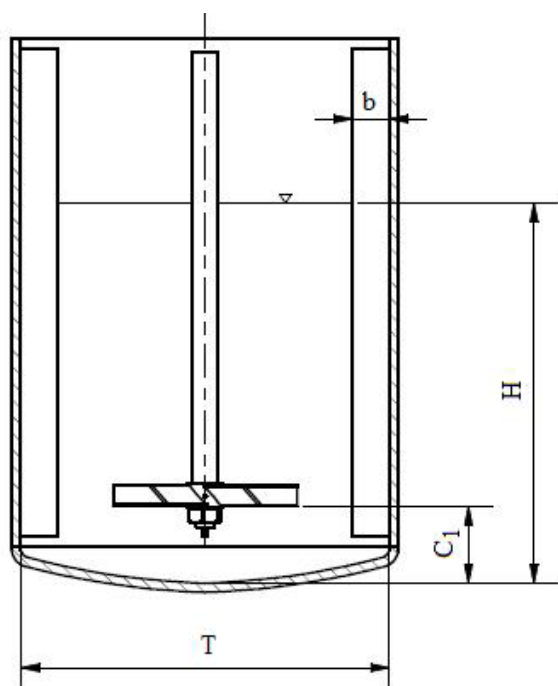
1. Úvod

Míchání suspenzí patří mezi nejčastější operace v potravinářském, chemickém a zpracovatelském průmyslu. Cílem míchání je vytvořit nucené proudění v nádobě, kterým dosáhneme vznosu nebo homogenity vsádky a tím maximalizujeme mezifázovou plochu potřebnou pro intenzivnější přenos hmoty či tepla. Nejčastěji se pro tento účel používají mechanické míchací systémy s jedním nebo několika rotačními míchadly. Tato míchadla lze rozdělit podle frekvence otáčení na rychloběžná, pracující při vyšších otáčkách a pomaloběžná, která pracují při nižších frekvencích otáčení. Rychloběžná míchadla se umísťují centricky do nádoby opatřené narážkami. Ty zabraňují tvorbě středového víru a zintenzivňují promíchávání suspenze. Důležitým parametrem pro návrh míchacích zařízení jsou příkon a otáčky vznosu, tj. stav, kdy částice vsádky nezůstávají nehybně ležet na dně nádoby, ale jsou rozptýleny v kapalně fázi, čímž je dosaženo maximální mezifázové plochy. Důležité je také dosažení homogenity a dostatečné cirkulace vsádky. V řadě procesů je nutné míchat vysoce koncentrované jemnozrnné suspenze, které na rozdíl od nízko-koncentrovaných vykazují odlišné chování. Většinou se chovají viskoplasticky a jejich reologické chování lze popsat pomocí modelu pro binghamské látky. Na rozdíl od nízko koncentrovaných suspenzí, kde je často potřeba dosáhnout pouze vznosu pevné fáze a rozptýlit ji v kapalině, je u vysoko koncentrovaných suspenzí požadována homogenizace a dostatečná cirkulace vsádky v celém jejím objemu. Proto je nezbytné sledovat pohyb a chování suspenze nejen na dně nádoby, ale i podél stěn a na hladině. Vzhledem k reologickému chování je nutné přistupovat k energetickým a geometrickým návrhům míchacích zařízení jinak než je tomu u nízko-koncentrovaných suspenzí. Při míchání nízko koncentrovaných suspenzí existuje pro návrh míchacích systémů dostatek informací (např. v [1]), ale pro vysoce koncentrované suspenze již tomu tak není. Cílem této práce je optimalizovat míchací systémy, porovnat vliv geometrického uspořádání míchadel při míchání vysoko koncentrované jemnozrnné suspenze a stanovit potřebné otáčky a příkon míchadla pro dostatečnou cirkulaci suspenze. Při experimentech bylo sledováno i to, jak se projeví zvýšení koncentrace pevné fáze v kapalině na příkonu a otáčkách potřebných k dostatečné cirkulaci vsádky a jaký vliv má na míchání počet narážek. Z provedených experimentů, kde se používaly normalizované typy rychloběžných a pomaloběžných míchadel, byly vybrány energeticky výhodné konfigurace míchacích systémů obou typů. Takto získané znalosti a poznatky při míchání vysoce koncentrovaných jemnozrnných suspenzí mohou být následně využity i v praktických průmyslových aplikacích.

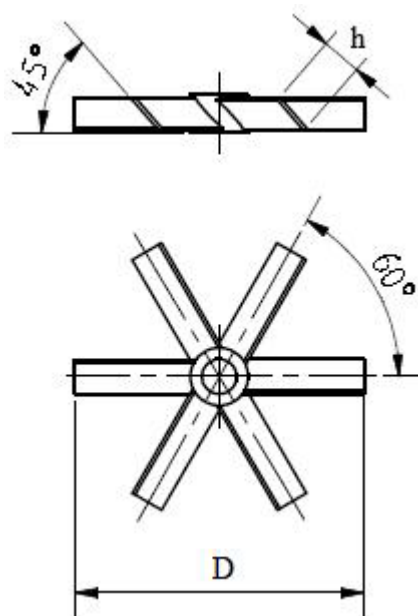
2. Popis experimentu

Všechny experimenty byly prováděny v průhledné válcové nádobě s klenutým dnem o vnitřním průměru $T = 200$ mm. Výška hladiny suspenze byla standardní, tedy $H = T$. Nádoba (obr. 2.1) byla osazena dvěma resp. čtyřmi narážkami o šířce $b = 0,1 \cdot T$, které zintenzivnily promíchávání vsádky. Při experimentu byly testovány nejčastěji používané typy rychloběžných a pomaloběžných míchadel. Ze skupiny rychloběžných byla použita šestilopátková míchadla s lopatkami skloněnými pod úhlem 45° (obr. 2.2) o průměru

$D = 66,7 \text{ mm}$ a $D = 100 \text{ mm}$ a míchadla etážová (obr. 2.3a), která byla tvořena dvěma šestilopatkovými míchadly stejného průměru. Během experimentu se měnila vzdálenost spodní hrany lopatek míchadla ode dna nádoby v rozmezí $C_1 = (0,25-1,25) \cdot D$. U etážových míchadel se ještě navíc měnila vzdálenost mezi míchadly v rozmezí $C_2 = (0,5-1,75) \cdot D$.

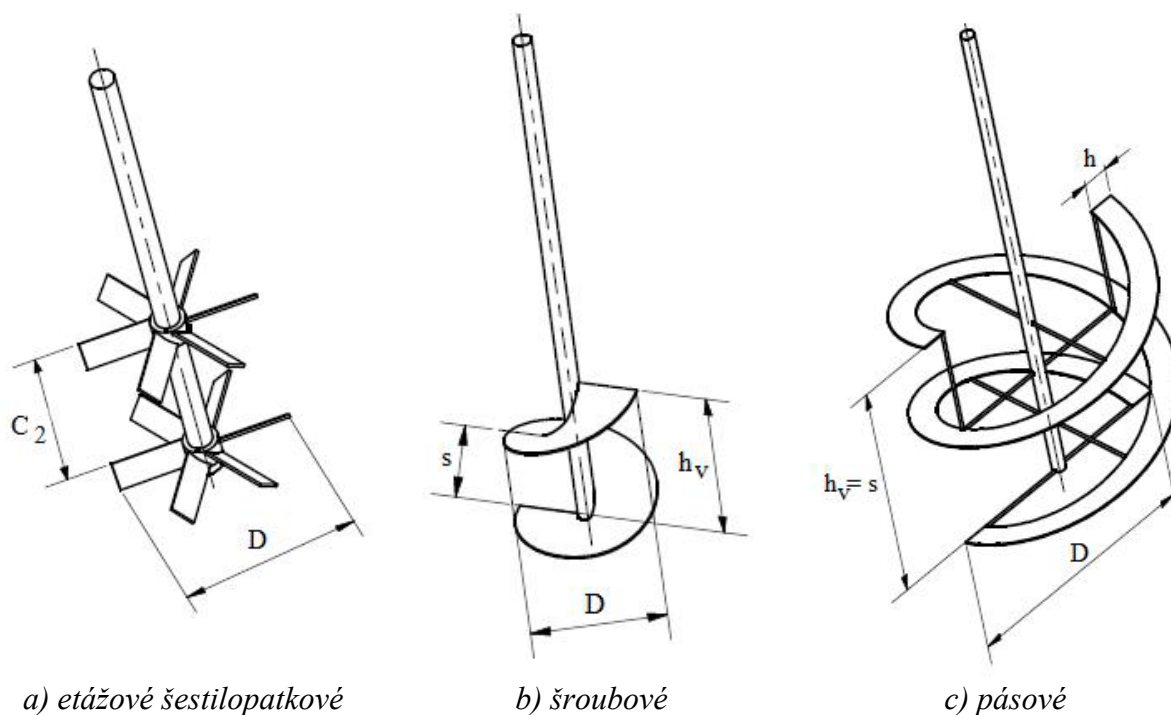


Obr. 2.1. Experimentální schéma nádoby



Obr. 2.2. Schéma použitého míchadla

Ze skupiny testovaných pomaloběžných míchadel bylo použito šroubové míchadlo s usměrňovacím válcem (SUV), excentricky umístěné šroubové míchadlo (SE) a pásové míchadlo (PAS).



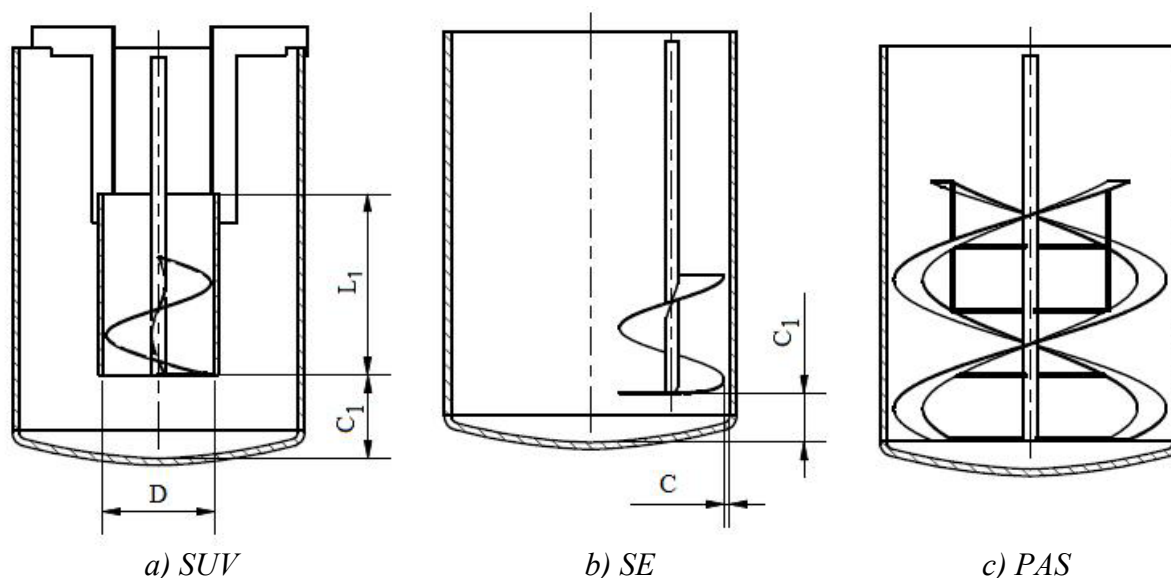
a) etážové šestilopatkové

b) šroubové

c) pásové

Obr. 2.3. Schémata použitých míchadel

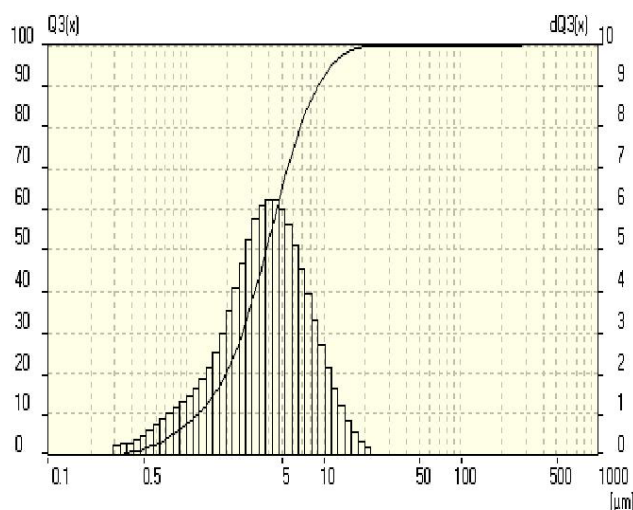
U systému *SUV* bylo použito šroubové míchadlo o průměru $D = 75$ mm s poměrem $h_v/D = 1,5$ a stoupáním šroubovice $s = D$ (viz obr. 2.3b). Průměr usměrňovacího válce měl hodnotu $D_I = 1,1 \cdot D$ a jeho délka byla $L_I = 130$ mm. Spodní hrana šroubového míchadla i difuzoru byla umístěna ve stejné výšce (obr. 2.4a). Excentricky umístěné šroubové míchadlo (obr. 2.4b) bylo ve vzdálenosti $C = 0,02 \cdot D$ od vnitřní stěny nádoby. Spodní hrana tohoto míchadla byla ve vzdálenosti $C_I = 0,25 \cdot D$ ode dna nádoby. Poslední použité míchadlo bylo pásové (obr. 2.3c) o průměru $D = 190$ mm, šířce pásu $h = 20$ mm a poměru $h_v/D = 1$. Spodní hrana míchadla byla v nádobě umístěna shodně s hranou spodní válcové části nádoby (obr. 2.4c).



Obr. 2.4. Umístění pomaloběžných míchadel v nádobě

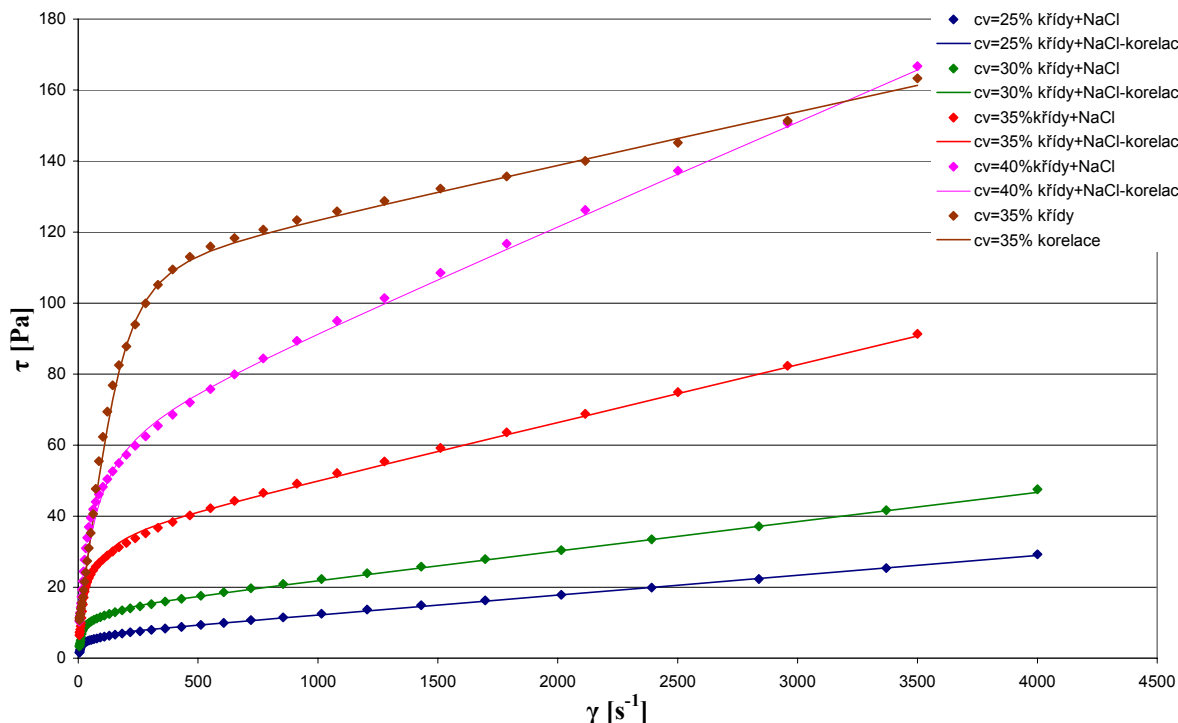
3. Vlastnosti testované suspenze

Měření byla prováděna se suspenzí, jejíž kapalnou fází tvořila voda a pevnou fází křída se středním objemovým průměrem částic $d_p = 5$ μm . Velikost částic byla vyhodnocena pomocí laserového přístroje Analysette A22 Compact, který slouží k zjišťování rozměrů a distribuce velikosti částic. Měřením testované pevné fáze bylo zjištěno diferenciální (četnostní) a integrální (kumulativní) rozložení částic křídý uvedené na obr. 3.1.



Obr. 3.1. Distribuční rozložení velikosti částic křídý

Hustota křídý byla $\rho_s = 2580 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a během experimentu se její objemová koncentrace měnila po 5 % obj. v intervalu $c_v = (0,25-0,40)$. Kapalná fáze navíc obsahovala rozpuštěný chlorid sodný NaCl o hmotnostní koncentraci $c_m = 5 \%$. Ten zde sloužil jako ztekucovadlo vsádky. Reologické vlastnosti suspenze byly naměřeny na reometru RC20 se souosými válci typu CC48 ($\chi = 0,98$). Výsledky těchto měření jsou zobrazeny v reogramu (obr. 3.2).



Obr. 3.2. Reogram testovaných suspenzí

Z reogramu je zřejmé, že se dá rozdělit do tří oblastí - dvě lineární a jedna přechodová. V první a třetí oblasti lze aproximovat závislost tečného napětí τ na smykové rychlosti $\dot{\gamma}$ pomocí modelu pro binghamskou látku

$$\tau = \tau_0 + \mu_p \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Tímto vztahem se dají aproximovat pouze lineární části reogramu, je ale nutné popsat i oblast přechodu mezi oběma oblastmi. Proto byl v [2] navržen pro popis takového reologického chování následující vztah

$$\tau = \frac{\tau_{01} + \mu_{p1} \cdot \dot{\gamma}}{\left[1 + \left(\frac{\tau_{01} + \mu_{p1} \cdot \dot{\gamma}}{\tau_{02} + \mu_{p2} \cdot \dot{\gamma}} \right)^b \right]^{\frac{1}{b}}} \quad (2)$$

Obsahuje parametry mezního tečného napětí a plastické viskozity při nízkých a vysokých hodnotách smykové rychlosti. Navíc obsahuje bezrozměrný parametr b , který právě aproximuje přechod mezi oběma oblastmi. Více informací o vzniku a použití toho vztahu lze nalézt v [2].

Z reogramu je patrný i vliv chloridu sodného NaCl na hodnoty mezních tečných napětí τ_0 , plastické viskozity μ_p a parametru b , který charakterizuje ostrost přechodu mezi oblastmi s nízkými a vysokými smykovými rychlostmi. Porovnání hodnot těchto parametrů je při objemové koncentraci křídý $c_v = 35 \%$ uvedeno v tabulce 1.

Tabulka 1. Parametry suspenze křídý o $c_v = 35\%$ s NaCl a bez NaCl

$c_v = 35\%$ křídý + NaCl ($c_m = 5\%$)	$c_v = 35\%$ křídý
$\mu_{p1} = 0,553 \text{ Pa} \cdot s$	$\mu_{p1} = 0,507 \text{ Pa} \cdot s$
$\tau_{01} = 3,816 \text{ Pa}$	$\tau_{01} = 8,277 \text{ Pa}$
$\mu_{p2} = 0,016 \text{ Pa} \cdot s$	$\mu_{p2} = 0,015 \text{ Pa} \cdot s$
$\tau_{02} = 34,625 \text{ Pa}$	$\tau_{02} = 108,915 \text{ Pa}$
$b = 1,5$	$b = 3,0$

Je zřejmé, že se hodnoty plastických viskozit u ztekucené a neztekucené suspenze mění velmi málo. Velký vliv soli je ale patrný u mezních tečných napětí, kde chlorid sodný dokáže tuto hodnotu snížit o 50-75 %, což má také velký vliv na energii potřebnou k rozpohybování celé suspenze a její dostatečné cirkulaci. Také hodnota parametru b je oproti hodnotě neztekucené suspenze poloviční.

4. Výsledky měření

Cílem měření bylo zoptimalizovat míchací systémy a vybrat energeticky výhodné varianty míchadel. Při experimentech se vycházelo z naměřených hodnot otáček a krouticích momentů. Otáčky hřídele byly měřeny elektronickým čítačem a jím odpovídající krouticí moment byl měřen dvěma metodami. Jedna metoda je založena na přenosu krouticího momentu z míchadla na stoleček, na kterém byla nádoba umístěna. Zde byl umístěn ohebný snímač a na něm byly nalepeny tenzometry zapojené do můstku. Druhým způsobem bylo měření krouticího momentu na hřídeli, kde byl umístěn snímač torzního natočení hřídele. Pomocí kalibračních křivek se odečetl z hodnot výstupních napětí příslušný krouticí moment. Oba snímače byly připojeny přes A/D převodníkovou kartu do PC. Z obou krouticích momentů a otáček se pak podle známého vztahu (3) dá stanovit příkon míchadla.

$$P = M_K \cdot \omega = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot M_K \quad (3)$$

Rozdíly hodnot vypočítaných příkonů ze snímače na hřídeli a na stolečku se lišily při nižších otáčkách přibližně o 20 %, s rostoucími otáčkami se ale jejich rozdíl snižoval a v turbulentní oblasti se lišily přibližně o 3-5 %.

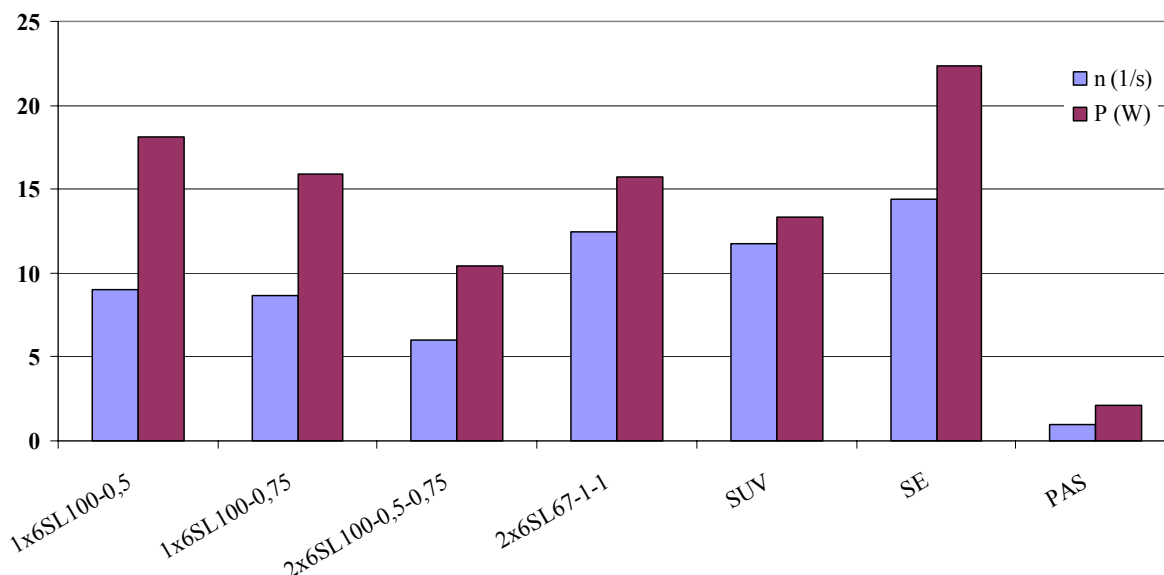
Dále je možné pro testované míchací systémy z naměřených dat a vypočítaných příkonů stanovit ze vztahu (4) příkonová čísla a zobrazit průběhy příkonových charakteristik.

$$Po = \frac{P}{\rho_{sus} \cdot n^3 \cdot D^5} \quad (4)$$

Klasická příkonová charakteristika je závislost příkonového čísla Po na Reynoldsově čísle Re . Vzhledem k obtížnosti stanovení smykové rychlosti na lopatce míchadla, a tím i hodnoty efektivní viskozity potřebné pro výpočet Reynoldsova čísla Re , nelze vykreslit klasické příkonové charakteristiky. Pro vytvoření alespoň hrubé představy lze však vyhodnotit závislost P/n^3 na otáčkách míchadla. V turbulentní oblasti proudění, kde by se experimenty měly odehrávat, je dle teorie [1] příkonové číslo Po konstantní. Hustota suspenze ρ_{sus} a průměr míchadla jsou též konstantní, musí tedy platit, že i poměr P/n^3 je konstantní. Tento fakt alespoň trochu přiblíží to, jak příkonová charakteristika vypadá. Proto příkonové charakteristiky nebudou uváděny v obvyklém tvaru závislosti příkonového čísla na Reynoldsově čísle, ale jako závislost podílu P/n^3 na otáčkách míchadla n .

4.1. Vyhodnocení a porovnání použitých rychloběžných a pomaloběžných míchadel

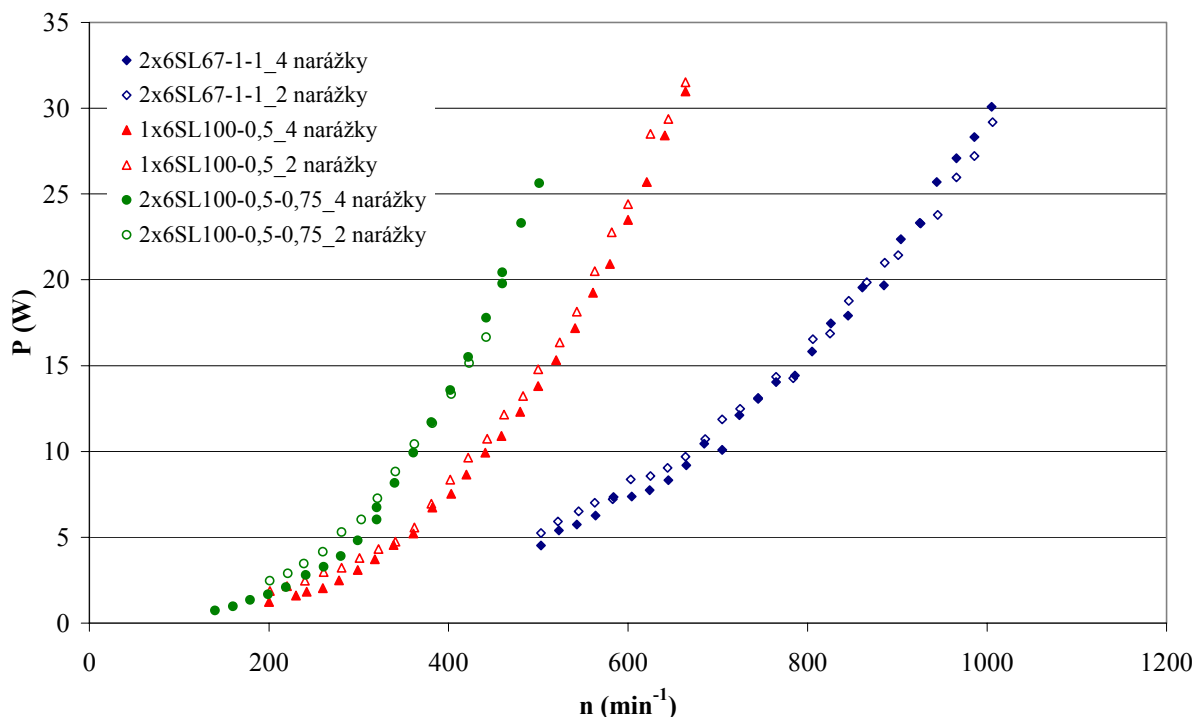
Všechny experimenty, jejichž cílem bylo nalézt vhodné míchadlo pro testovanou vsádku, byly provedeny v suspenzi o objemové koncentraci křídly $c_v = 35 \%$. U všech proměřovaných konfigurací byly stanoveny otáčky cirkulace a příkony. Na základě těchto hodnot se stanovily optimální energetické konfigurace jak rychloběžných, tak pomaloběžných míchadel. Porovnání hodnot příkonů a otáček cirkulace optimálních konfigurací je uvedeno na obr. 4.1.



Obr. 4.1. Porovnání příkonů a otáček cirkulace pro dosažení dostatečného pohybu vsádky

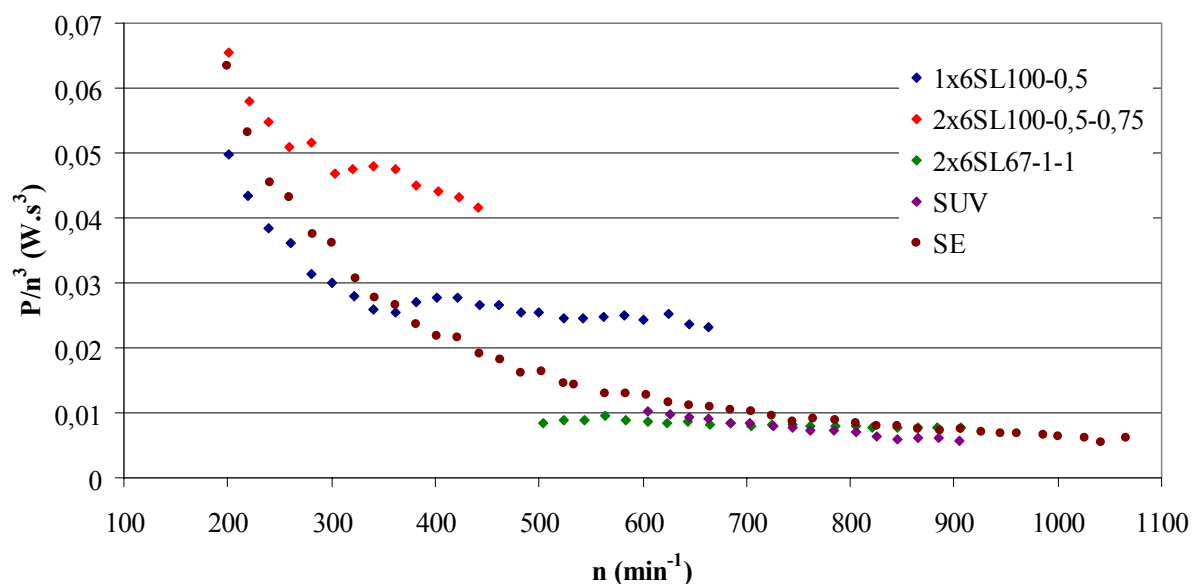
Z porovnání je patrné, že by energeticky nejvýhodnějším typem systému při míchání vysoce koncentrované jemnozrnné suspenze mělo být pásové míchadlo (PAS). Tak tomu ale není. Při vizuálním sledování testované suspenze bylo totiž zjištěno, že k promíchání vsádky dochází pouze u stěn nádoby, ale v oblasti podél hřídele míchadla a na dně nádoby se suspenze pouze točí. Nedochází tedy k jejímu axiálnímu promíchávání. Energeticky nejvýhodnější variantou je tedy použití etážového míchadla s poměrem $T/D = 2$, které je umístěno ve vzdálenosti $C_1 = 0,5 \cdot D$ ode dna nádoby se vzdáleností mezi míchadly $C_2 = 0,75 \cdot D$. Druhou nejvýhodnější variantou je ze skupiny pomaloběžných míchadel šroubové míchadlo s usměrňovacím válcem (SUV). Etážové míchadlo s poměrem $T/D = 3$ je energeticky téměř stejně výhodné jako použití samotných šestilopatkových míchadel (6SL100). Liší se od nich pouze vyššími otáčkami, potřebnými k dosažení dostatečné cirkulace vsádky. Při porovnání energetické náročnosti samostatného a etážového míchadla (1x6SL100 a 2x6SL67) je zřejmé, že při použití etážového míchadla je příkon o 50-60 % nižší. Varianta excentricky umístěného šroubového míchadla (SE) již patří k těm horším, neboť příkon potřebný pro dosažení dostatečné cirkulace je přibližně 1,8x vyšší než při použití systému SUV. Ostatní testované konfigurace míchadel v grafu uvedeny nejsou, neboť jejich příkony se pohybovaly ve vyšších hodnotách.

Při měření byl sledován i vliv počtu nárazů při míchání suspenze. Z experimentů vyplynulo, že počet nárazů v nádobě není pro dostatečné promíchání rozhodující (obr. 4.2). Nádobu stačí tedy osadit pouze dvěma nárazkami, které zabrání rotaci vsádky v nádobě. Hlavní vliv na míchání suspenze má pouze energie, kterou musíme do systému přivést, abychom dosáhli dostatečné cirkulace.



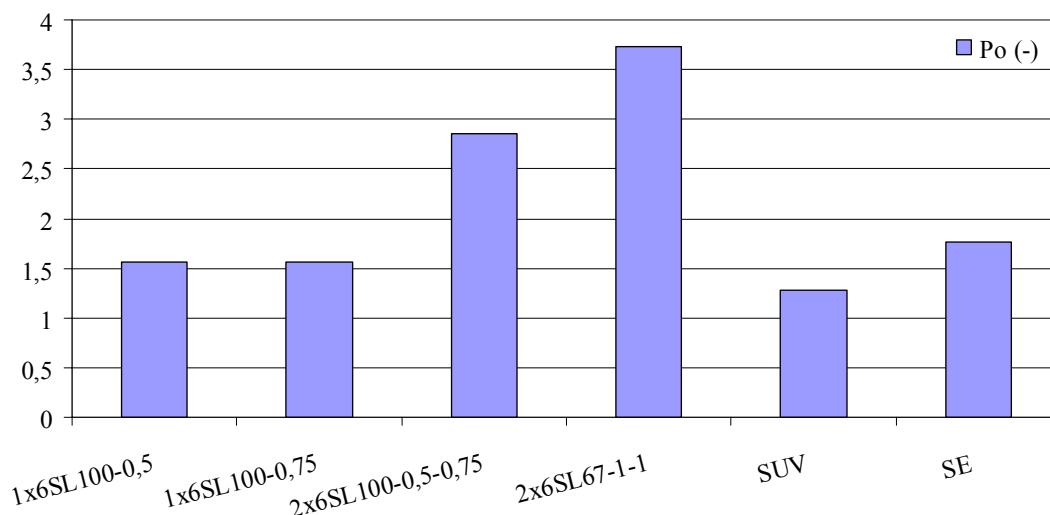
Obr. 4.2. Porovnání potřebných příkonů při různém počtu narážek při 35 % obj. křídly s NaCl

Jelikož byl krouticí moment testovaných míchadel proměřován v širokém pásmu otáček, bylo možné sestavit modifikovanou příkonovou charakteristiku, závislost poměru P/n^3 na otáčkách míchadla n (obr. 4.3).



Obr. 4.3. Závislost poměru P/n^3 na otáčkách použitých míchadel

Z grafické závislosti je zřejmé, že při vyšších hodnotách otáček n je poměr P/n^3 konstantní a míchání se tedy odehrává v turbulentní oblasti. V této oblasti proto můžeme vzhledem k výše uvedeným teoretickým podkladům stanovit hodnoty příkonových čísel Po jednotlivých míchadel, a to jako průměrnou hodnotu z příkonových čísel vypočítaných pro data z této oblasti pomocí vztahu (4).



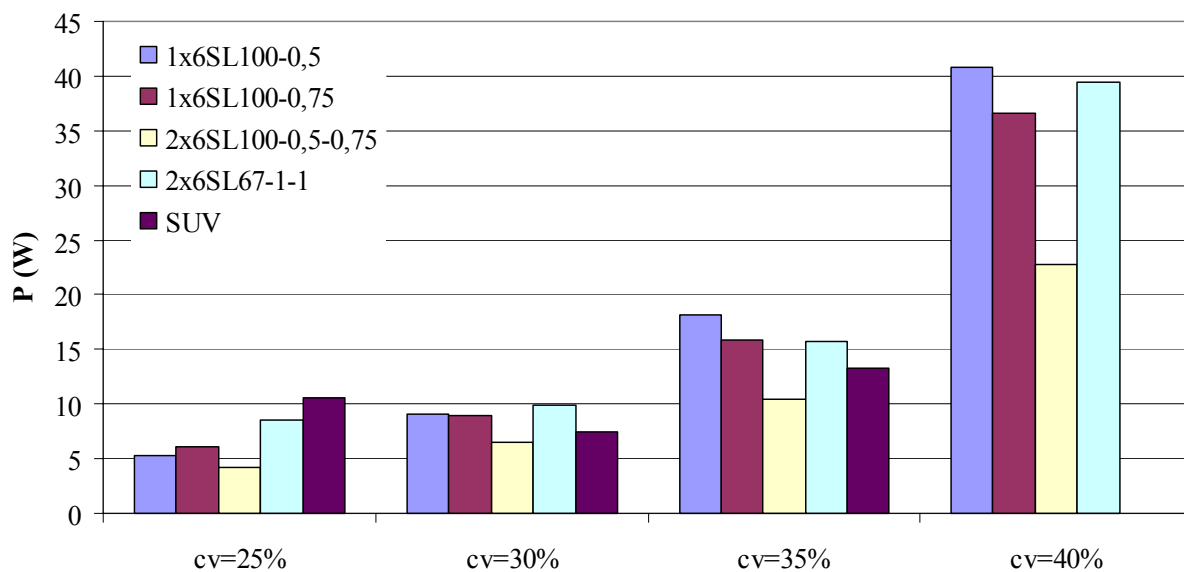
Obr. 4.4. Porovnání příkonových čísel použitých míchadel

Z porovnání příkonových čísel (obr. 4.4) je patrné, že velikost příkonového čísla u šestilopátkového míchadla je konstantní a nezávisí na vzdálenosti ode dna. Jeho hodnota se pohybuje přibližně v rozmezí $Po = 1,5-1,6$. Teoretická hodnota příkonového čísla podle [1] pro šestilopátkové míchadlo je $Po = 1,8$. Hodnota získaná experimentem je tedy o něco nižší, což však může být ovlivněno chybami v kalibraci snímačů a odchylkami při měření. V případě etážového míchadla by měla podle teorie [3] být hodnota příkonového čísla etážového míchadla o něco nižší než je součet příkonových čísel Po samostatných míchadel. Tento fakt byl rovněž potvrzen v prováděných experimentech, jak je patrné z grafu.

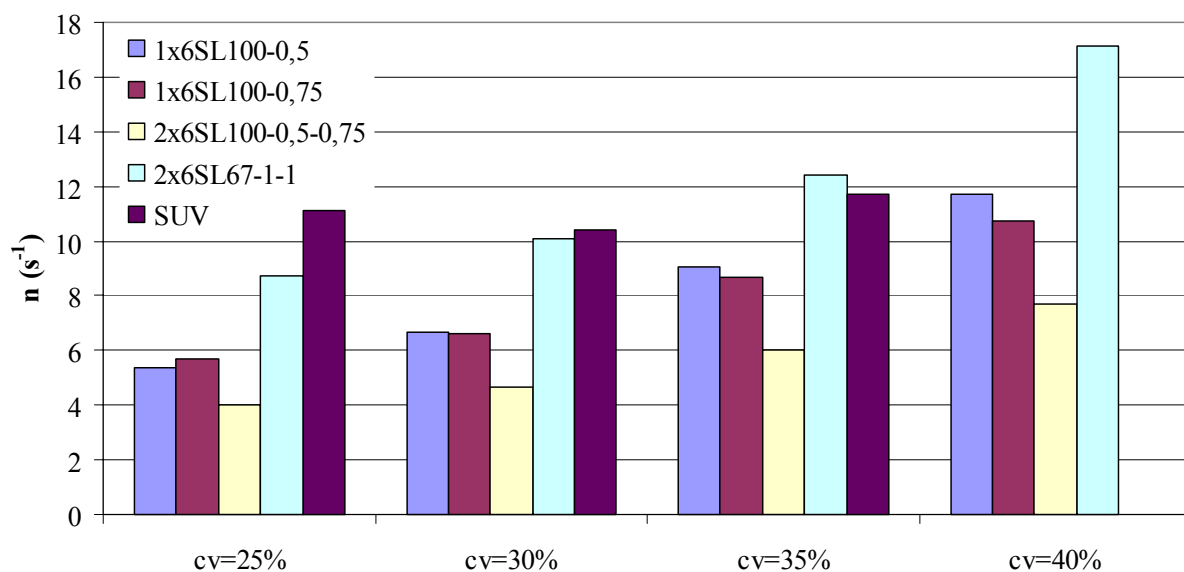
4.2. Vyhodnocení vlivu koncentrace na příkon a otáčky cirkulace u vybraných variant

Pro nejvýhodnější varianty rychloběžných a pomaloběžných míchadel byly dále provedeny experimenty, v nichž byl sledován vliv koncentrace na příkon a otáčky cirkulace a to v intervalu $c_v = (25-40) \%$. Na obr. 4.5 jsou uvedeny výsledky závislosti příkonu P na objemové koncentraci křídý c_v a na obr. 4.6 je závislost otáček n potřebných k cirkulaci suspenze na objemové koncentraci křídý c_v .

Při pohledu na obr. 4.6 je zřejmé, že se potřebné otáčky vnosu u rychloběžných typů míchadel mění lineárně s rostoucí koncentrací suspenze. U systému SUV se otáčky vnosu téměř nemění. Tento fakt může být způsoben tím, že pod difuzorem vznikala zóna, kde suspenze dlouhou dobu neproudila a odtržení této oblasti pak následně ovlivňovalo posouzení cirkulace vsádky. Pro rozbití této zóny tudíž stačil pouze malý přírůstek otáček míchadla. Při objemové koncentraci $c_v = 40 \%$ je tento systém již nepoužitelný, protože zde nebylo dosaženo cirkulace celé vsádky a míchadlo přisávalo vzduch z prostoru nad hladinou.



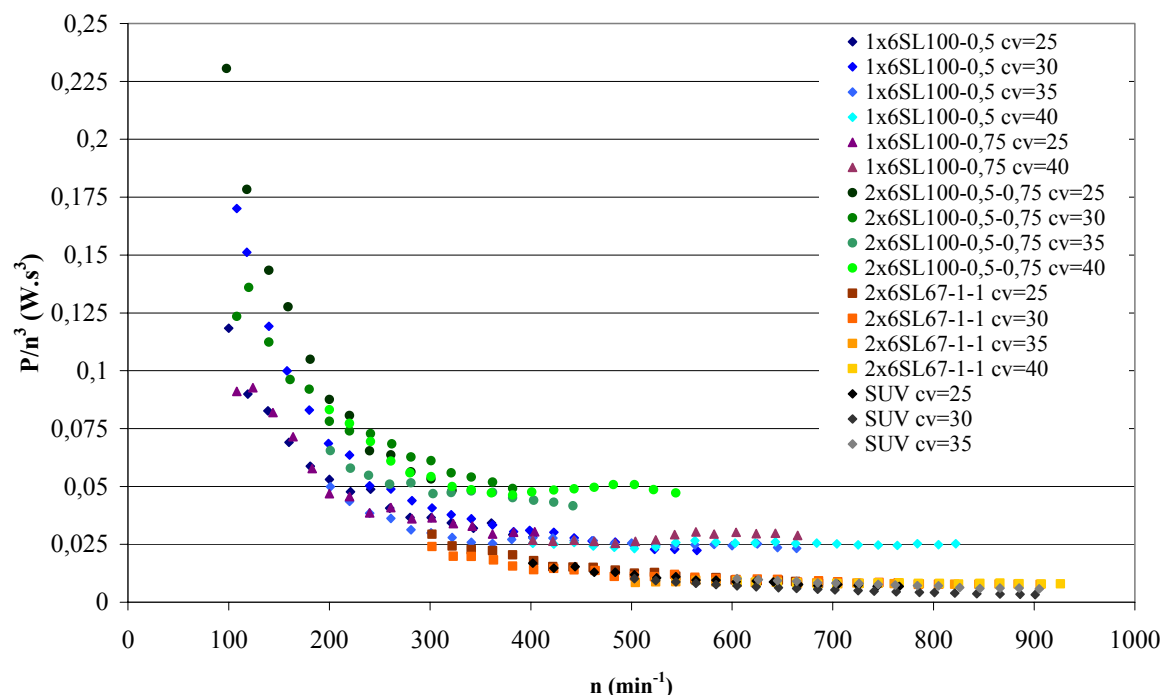
Obr. 4.5. Porovnání vlivu koncentrace na příkony pro jednotlivé míchací systémy



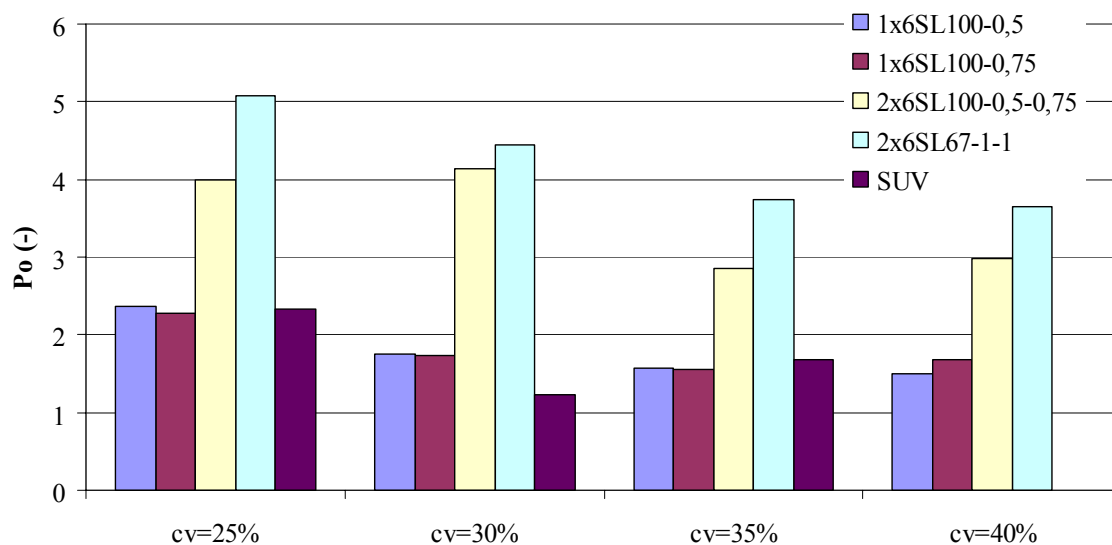
Obr. 4.6. Porovnání vlivu koncentrace na otáčky cirkulace pro jednotlivé míchací systémy

Při porovnání umístění šestilopátkových míchadel nade dnem je patrné, že pro koncentrace pevné fáze do $c_v = 30\%$ je výhodnější umístění $C_l = 0,5 \cdot D$ nade dnem a při koncentracích nad $c_v = 30\%$ je lepší polohovat spodní hranu lopatky míchadla ve vzdálenosti $C_l = 0,75 \cdot D$ nade dnem nádoby. Z průběhu růstu příkonů v závislosti na koncentraci (obr. 4.5) je zřejmé, že zde se průběh mění jinak než lineárně. Příkon je dle vztahu (4) úměrný třetí mocnině otáček, což graf dobře vystihuje. Z naměřených hodnot byly opět sestaveny modifikované příkonové charakteristiky, zobrazené na obr. 4.7.

Na obr. 4.8 je pak pro jednotlivé koncentrace zobrazeno porovnání příkonových čísel stanovených v oblasti vyšších otáček míchadla, kde byl opět poměr P/n^3 konstantní.



Obr. 4.7. Závislost poměru P/n^3 na otáčkách použitých míchadel při různých koncentracích c_v



Obr. 4.8. Závislost příkonových čísel na typu použitých míchadel a koncentraci

5. Závěr

Z uvedených výsledků tedy vyplývá, že při míchání vysoce koncentrovaných suspenzí při klasickém uspořádání $H = T$ je energeticky nejvýhodnější použití rychloběžného etážového míchadla o parametrech $T/D = 2$, $C_1 = 0,5 \cdot D$ a $C_2 = 0,75 \cdot D$, tedy míchadla s větším průměrem při rovnoměrném rozmístění jednotlivých míchadel tak, aby se zóny jednotlivých míchadel příliš nerušily, což má za následek výrazné snížení příkonu potřebného k cirkulaci vsádky. Příkon těchto míchadel při míchání koncentrovaných suspenzí bude o 50-60 % nižší než při použití samostatného šestilopatkového míchadla. Další optimální variantou je také samostatné šestilopatkové míchadlo s parametry $T/D = 2$, $C_1 = (0,5-0,75) \cdot D$. Stejného

výsledku může být dosaženo i pomocí etážového míchadla o parametrech $T/D = 3$, $C_1 = D$ a $C_2 = D$. Použití pomaloběžných míchadel je v tomto případě z energetického hlediska méně výhodné, i když systém šroubového míchadla s usměrňovacím válcem SUV je méně náročný než je tomu u samostatných šestilopátkových míchadel. Velkou nevýhodou systému SUV je jeho konstrukční náročnost, nutnost dosažení vysokých frekvencí otáčení a tím pádem i vyšší pořizovací náklady a především omezenost použití, protože tento systém bylo možné použít pro koncentrace křídly menší jak 35 % obj.

Seznam použitých symbolů

b	šířka narážky	[m]
b	volitelný parametr ve vztahu (2)	[1]
C	vzdálenost míchadla od stěny nádoby	[m]
C_1	vzdálenost spodní hrany lopatek míchadla ode dna nádoby	[m]
C_2	rozteč mezi míchadly	[m]
c_v	střední objemová koncentrace pevné fáze	[1]
d_p	střední průměr částic pevné fáze	[m]
D	průměr míchadla	[m]
h	výška lopatky míchadla, šířka pásu	[m]
h_v	délka šroubového či pásového míchadla	[m]
H	výška hladiny v nádobě	[m]
M_k	krouticí moment	[N·m]
L_1	délka usměrňovacího válce	[m]
n	otáčky míchadla	[s ⁻¹]
P	příkon	[W]
Po	příkonové číslo	[1]
s	stoupání šroubovice	[m]
T	průměr nádoby	[m]

Řecké symboly

$\dot{\gamma}$	smyková rychlost	[s ⁻¹]
μ_p	plastická viskozita	[Pa·s]
μ_{p1}	plastická viskozita při nízkých smykových rychlostech	[Pa·s]
μ_{p2}	plastická viskozita při vysokých smykových rychlostech	[Pa·s]
ρ	hustota suspenze - $\rho = c_v \rho_s + (1 - c_v) \rho_l$	[kg·m ⁻³]
ρ_l	hustota kapalné fáze	[kg·m ⁻³]
ρ_s	hustota pevné fáze	[kg·m ⁻³]
τ_0	mezní tečné napětí	[Pa]
τ	smykové napětí	[Pa]
τ_{01}	mezní tečné napětí při nízkých smykových rychlostech	[Pa]
τ_{01}	mezní tečné napětí při vysokých smykových rychlostech	[Pa]
χ	poměr poloměrů válců reometru - $\chi = R_1 / R_2$	[-]

Seznam použité literatury

- [1] Rieger, F., Novák, V., Jirout, T.,: Hydromechanické procesy II., ČVUT, 2006
- [2] Rieger, F., Moravec, J.,: Rheometry of the Fine Concentrated Suspensions, In: Novel Trends in Rheology II, UTB Zlín, 2007, str.184
- [3] Rieger, F.,: Mixing with multiple impeller with two inclined blades, In 13.polská konference chemického a procesního inženýrství, Štětín 1989, str.168