

Studium erozivního opotřebení lopatek míchadla – vliv tvarového opotřebení lopatek na procesní charakteristiky míchadla

Michal Kovářík, Petr Fišer

Vedoucí práce: Doc. Ing. Tomáš Jirout, Ph.D.

Abstrakt

V průběhu míchání suspenzí dochází k opotřebování lopatek míchadla. Důsledkem opotřebení jsou změny procesních charakteristik míchání. Předmětem této studie bylo zjistit závislosti procesních charakteristik na opotřebení míchadla.

Klíčová slova

axiální míchadlo, homogenizace, opotřebení, suspenze, suspendace

1. Úvod

Při vzájemném kontaktu lopatek míchadla s rovnými šikmo skloněnými lopatkami s pevnou zrnitou fází vysoké tvrdosti unášenou turbulentně proudící kapalinou dochází na jejich náběžné hraně ve směru od vnější hrany lopatky k jejich ubývání. Pro popis změny tvaru náběžné hrany lopatky (viz obr. 1) v průběhu jejího erozivního opotřebení, bez zkrácení její délky (tj. bez zmenšení průměru míchadla), byl na základě vyhodnocení četných experimentálních dat navržen Fořtem a kol. [1] zjednodušený dvou-parametrový model ve tvaru exponenciální závislosti

$$H(R) = 1 - C \exp[k(1 - R)], \quad (1)$$

kde bezrozměrná axiální (vertikální) souřadnice podél šířky lopatky je

$$H = \frac{y(r)}{h} \quad (2)$$

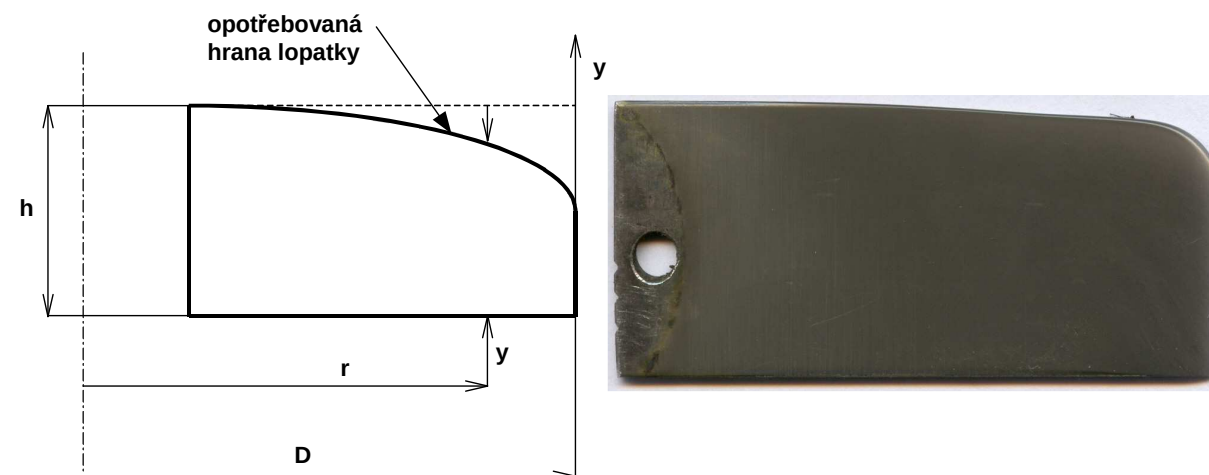
a bezrozměrná radiální souřadnice podél poloměru lopatky míchadla je

$$R = \frac{2r}{D}. \quad (3)$$

Parametry h a D charakterizují šířku lopatky a průměr míchadla.

Hodnoty parametrů modelu změny tvaru lopatky míchadla dle rov. (1) – rychlostního parametru erozivního opotřebení k a geometrického parametru profilu opotřebení hrany lopatky C , byly stanoveny vyhodnocením experimentálně získaných profilů opotřebovaných náběžných hran lopatek metodou nejmenších čtverců. Závislost parametrů C a k na frekvenci otáčení míchadla, sklonu a materiálu lopatek a vlastnostech suspenze byla stanovena v předchozích experimentech [2].

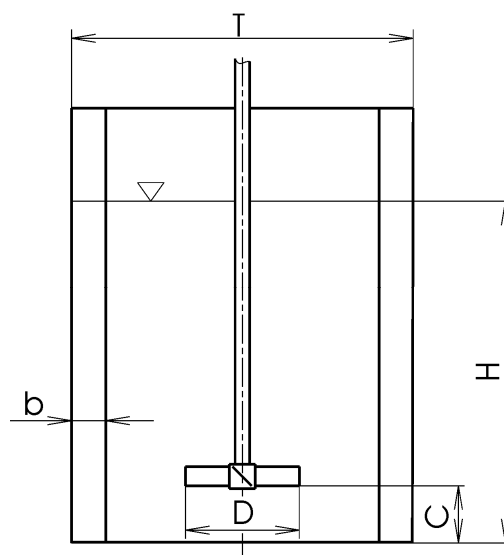
Cílem této navazující práce je stanovit vliv změny tvaru lopatky v důsledku jejího erozivního opotřebení na jednotlivé procesní charakteristiky míchadla se skloněnými lopatkami.



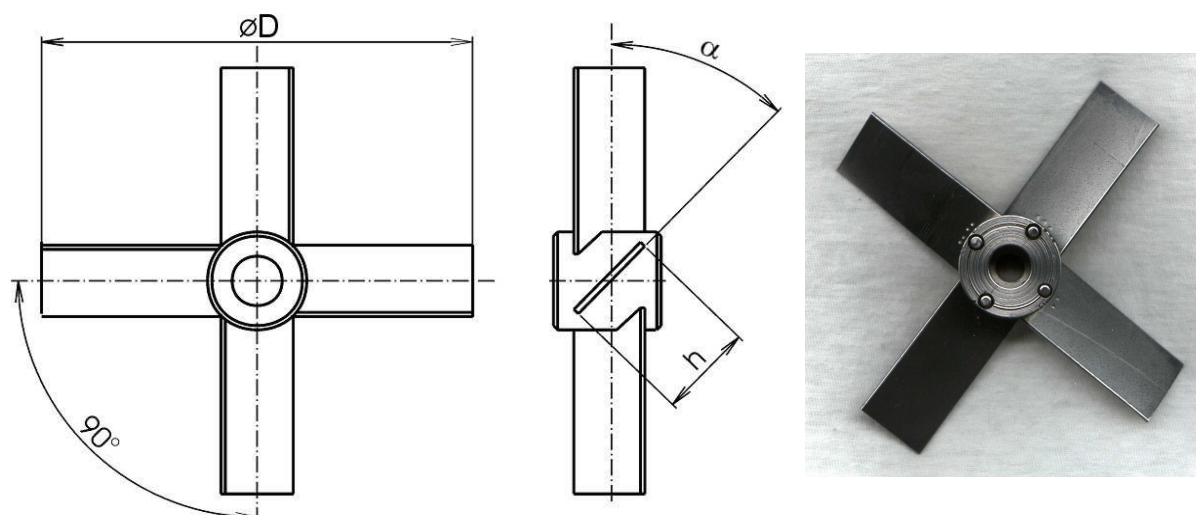
Obr. 1. Tvar náběžné hrany erozivně opotřebované lopatky míchadla s rovnými šikmo skloněnými lopatkami.

2. Parametry měření

Experimentální sledování opotřebení lopatek míchadla probíhalo v nerezové válcové nádobě s rovným dnem o vnitřním průměru $T = 300$ mm. Nádoba byla u stěny vybavena čtyřmi standardními radiálními narážkami o šířce $b = 0,1 \cdot T$. Výška hladiny byla rovna průměru nádoby $H = T$. Na obr. 2 je znázorněno schéma uspořádání experimentu. V průběhu experimentů bylo sledováno opotřebení lopatek míchadla se čtyřmi lopatkami skloněnými pod úhlem $\alpha = 30^\circ$ o průměru $D = 100$ mm (viz obr. 3). Lopatky míchadla byly vyrobeny z konstrukční oceli obvyklé jakosti 11 321 ČSN 41 1321 a jejich počáteční tloušťka byla $s_0 = 1,00 \pm 0,05$ mm. Poměr průměru nádoby k průměru míchadla byl $T/D = 3$ a výška míchadla nade dnem byla rovna jeho průměru $C = D$. Smysl otáčení míchadla byl volen tak, aby čerpalo suspenzi směrem ke dnu nádoby. Jako modelová suspenze pro opotřebení lopatek byla užívána vodná suspenze korundu o středním průměru částic 0,21 mm a střední objemové koncentraci 5 %. Opotřebení lopatek míchadla probíhalo při frekvenci otáčení míchadla $n = 900 \pm 2 \text{ min}^{-1}$.



Obr. 2. Uspořádání experimentu.
Geometrické parametry $H/T = 1$; $T/D = 3$;
 $C/D = 1$



Obr. 3. Čtyřlpatkové míchadlo se skloněnými lopatkami ($\alpha = 30^\circ$; $D = 100 \text{ mm}$; $h/D = 0,2$).

V pravidelných časových intervalech (po 10ti hodinách míchání) byly lopatky skenovány a váženy a byl postupem uvedeným v [2] vyhodnocován tvar takto opotřebovaných lopatek dle rov. (1). Hodnoty takto experimentálně stanovených parametrů modelu C a k v závislosti na době opotřebení t jsou souhrnně uvedeny v tab. 1. U neopotřebovaných lopatek i v každém okamžiku sledování změny tvaru opotřebovaných lopatek byly experimentálně stanoveny procesní charakteristiky míchadla (příkon míchadla, homogenizační účinky míchadla, suspendační účinky míchadla).

3. Postup měření

3.1 Příkon míchadla – příkonová charakteristika v turbulentní oblasti proudění

Míchací stanice (obr 4):

- Pohon (elektromotor) s nastavitelnou hodnotou otáček
- Otočný stůl přenášející kroutící moment (měří se jako síla působící na tenzometr viz obr.5)
- Odporová dekáda na vyvážení odporu tenzometru
- PC – slouží k zaznamenávání hodnot (napětí na tenzometru, 60 hodnot za 30s) z nichž vytvoří aritm. průměr (v nádobě proudí kapalina turbulentně, přenášený M_k není konstantní v závislosti na čase)



Obr. 4. Míchací stanice s otočným stolem pro měření příkonu

Průběh měření:

Válcová nádoba opatřená u stěny čtyřmi narážkami (obr. 2, 6) byla naplněna do výšky $H=T=300\text{mm}$ vodou. U neopotřebovaných a plně opotřebovaných lopatek byla nádoba naplněna také směsí glycerinu s vodou. Tato směs měla větší viskozitu a měření bylo přesnější. Princip měření je založen na přenosu hybnosti z lopatek přes kapalinu na nádobu. Otáčky míchadla byly voleny od hodnoty 100 ot./min postupným navyšováním o 17% až do okamžiku kdy se z hladiny začal přisávat vzduch. Měření byla tedy prováděna pro otáčky 100, 117, 137, 160, 187, 220, 257 ot/min. Pro každou hodnotu otáček byly naměřeny tři střední hodnoty a směrodatné odchylky napětí na tenzometru. Po odměření všech hodnot byly změřeny střední hodnoty a směrodatné odchylky s nulovými otáčkami. Z těchto hodnot byl dopočten pasivní odpor otočného stolu.



Obr. 5. Tenzometr, silonový kroužek přenášející M_k z otočného stolu na tenzometr

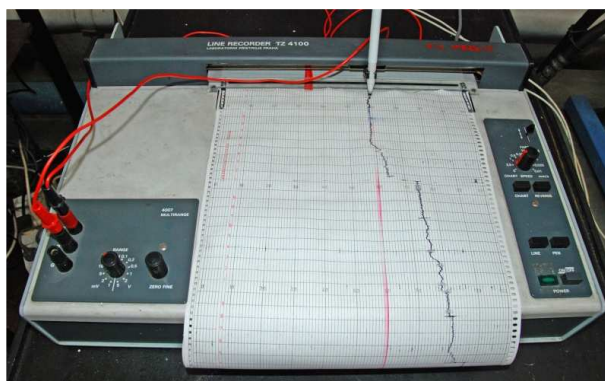


Obr. 6. Nádoba s narážkami

3.2 Homogenizační účinky míchadla – homogenizační charakteristika v turbulentní oblasti proudění

Míchací stanice:

- Pohon (elektromotor) s plynule nastavitelnou hodnotou otáček (obr. 8)
- Vodivostní sonda tvořená dvěma rovnoběžnými rámečky z platinového drátu, upevněnými v tělisku z texogumoidu zalitém epoxidovou pryskyřicí ve skleněné trubičce (obr. 9)
- Tenzometrická aparatura pracující na principu měření odporu Wheatsonovou metodou
- Odporová dekáda na vyvážení odporu sondy
- Liniový zapisovač s nastavitelným rozsahem a měnitelnou rychlostí a směrem posuvu (obr. 7)



Obr. 7. Liniový zapisovač



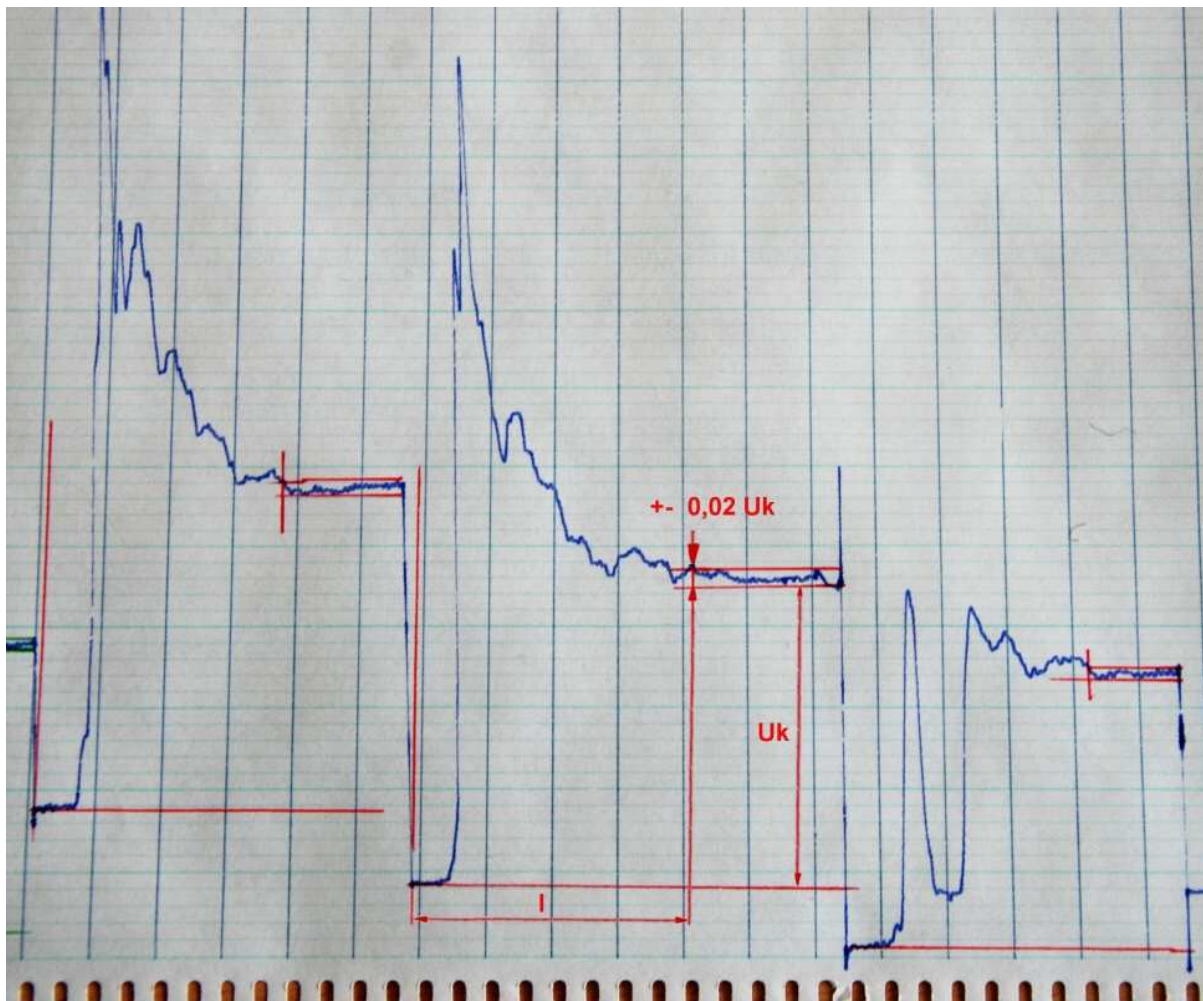
Obr. 8. Pohon



Obr. 9. Vodivostní sonda

Průběh měření:

Válcová nádoba opatřená u stěny čtyřmi narážkami (obr. 2, 6) naplněná do výšky $H=T=300\text{mm}$ destilovanou vodou byla položena na desce míchací stanice. Míchadlo bylo nasazeno na elektricky odizolovaný hřídel. Vodivostní sonda byla umístěná ve vzdálenosti od stěny nádoby $T/10$ a ponořená $T/4$ pod hladinou. Po spuštění míchadla a vyvážení odporu sondy dekádou byla ustavena poloha pisátka zapisovacího zařízení (frekvence otáček míchadla byly voleny stejné jako při měření příkonu míchadla). Následně byl injekční stříkačkou pod hladinu ke hřídeli vstříknut roztok NaCl o koncentraci 5g/l a zároveň bylo spuštěno zapisovací zařízení. Po rozmíchání přidaného roztoku a ustálení pisátka v konečné poloze bylo zapisovací zařízení zastaveno. S ohledem na stochastický charakter měření homogenizace byl tento postup opakován 5x pro stejnou hodnotu frekvence otáčení. Poté byla z vykreslených grafů odečtena doba homogenizace jako čas, po kterém byla fluktuace vodivosti (napětí) menší, než 2% z celkové změny vodivosti (viz obr. 10). Střední doba homogenizace byla určena jako aritmetický průměr naměřených hodnot.



Obr. 10. Zaznamenané grafy průběhu vodivosti

3.3 Suspensivní účinky míchadel – frekvence otáčení míchadla potřebná pro dosažení stavu vznosu a požadovaného stupně homogenity suspenze

Míchací stanice:

- Pohon (elektromotor) s plynule nastavitelnou hodnotou otáček (obr. 8)
- Nádoba umístěná ve stojanu se zrcátkem pro pozorování dna (obr. 11)

Průběh měření:

Válcová nádoba opatřená u stěny čtyřmi narážkami (obr. 2, 6) byla naplněná do výšky $H=T=300\text{mm}$ suspenzí vody a skleněných kuliček o středním objemovém průměru $d_{p1}=0,2\text{mm}$ a $d_{p2}=0,8\text{mm}$ a střední objemové koncentraci $c_{vA}=2,5\%$ a $c_{vB}=10\%$. Úkolem měření bylo, zaznamenat otáčky potřebné k míchání, kdy mrak suspenze dosáhne 90% výšky vsádky a otáčky kdy v nádobě nejsou nepohybující se pevné částice. Měření se opakovalo 5x pro stejnou stř. obj.



Obr. 11. Nádoba ve stojanu

koncentraci a stejný stř. obj. průměr, přičemž průměrná hodnota se vypočítala jako aritmetický průměr z těchto měření.

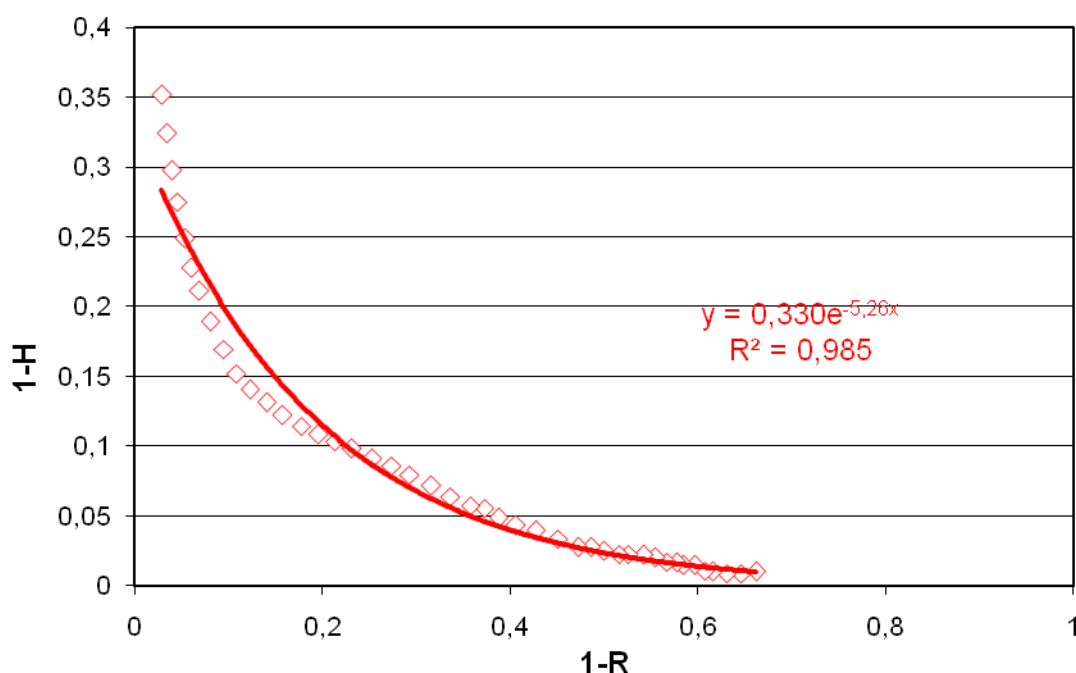
Tento způsob měření je subjektivní záležitostí. Výsledky se mohou lišit až o 10% v závislosti na osobním odhadu a zkušenosti osoby provádějící měření.

4. Výsledky měření

4.1 Vyhodnocení opotřebení

Vyhodnocení opotřebení se provádělo z oskenovaných lopatek. Pomocí programu tracer se zaznamenaly body na opotřeбенé hraně lopatky. Těmito body se následně proložila exponencionální křivka viz obr. 12. Ze čtyř lopatek se dopočítaly průměrné hodnoty geometrických parametrů opotřebení C a rychlostních parametrů opotřebení k .

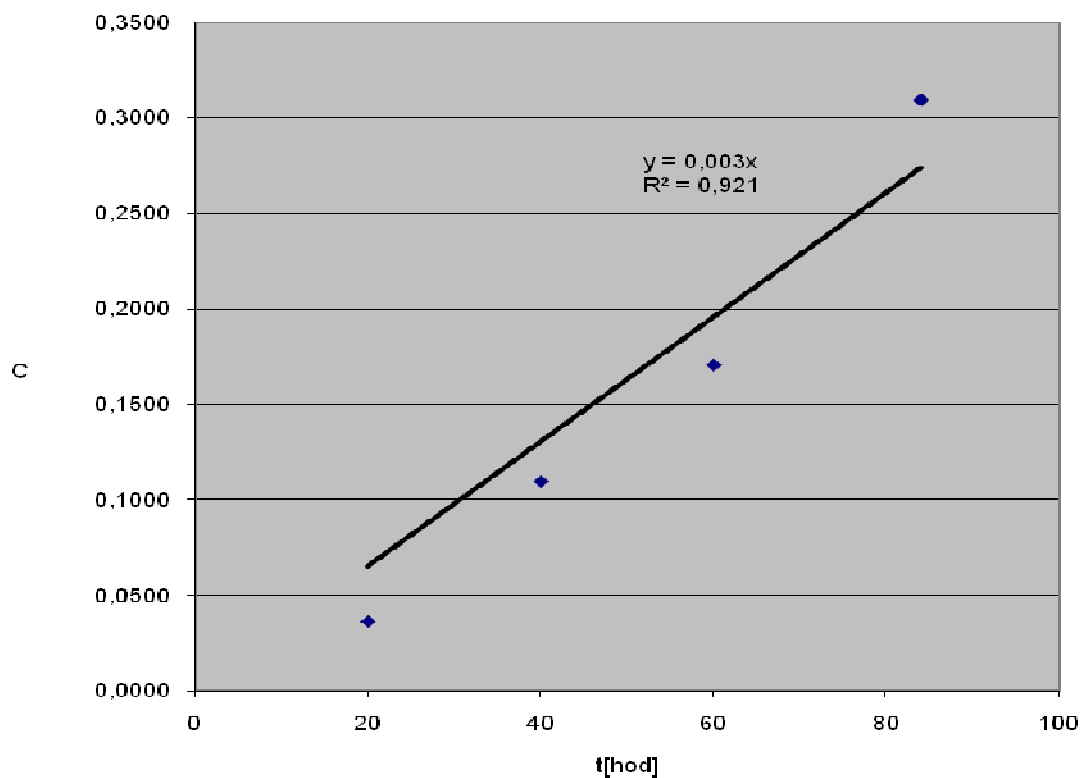
Získané hodnoty, uvedené v tabulce 1 a v obr. 13 vypovídají o lineární závislosti geometrického parametru opotřebení C na čase t . Z těchto hodnot lze zjistit, že rychlostní parametr opotřebení k není funkcí času, což potvrzuje výsledky předchozích studií [1].



Obr. 12. Tvar rovnice radiálního profilu náběžné hrany lopatky.

Tabulka 1. Závislost parametrů C a k na době opotřebení t .

t [hod]	C	k
20	0,0362	-4,16
40	0,1095	-4,47
60	0,1705	-4,34
84	0,3093	-4,34



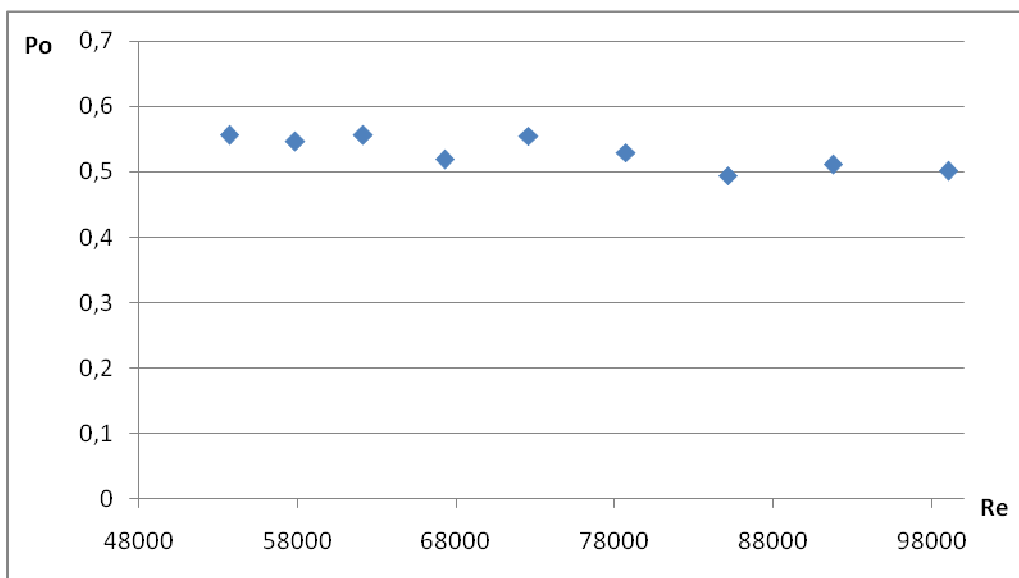
Obr. 13. Závislost geometrického parametru opotřebení C na době opotřebení t .

4.2 Vliv opotřebení lopatek na příkon míchadla

Z naměřených a zprůměrovaných hodnot příkonového čísla byla sestavena tabulka 2. Z této tabulky vyplývá, že příkonové číslo zůstává konstantní nezávisle na opotřebení. Na základě teoretického rozboru uvedeného v [3] nezávisí v turbulentní oblasti proudění hodnota příkonového čísla na Reynoldsově čísle. Výsledky měření příkonu s neopotrebovanými i opotrebovanými lopatkami prokázaly, že ve skutečnosti tomu tak je. Viz obr. 14.

Tabulka 2. $Po=f(Re)$ pro t

t [hod]	Po
0	0,49
20	0,56
40	0,47
60	0,54
84	0,42



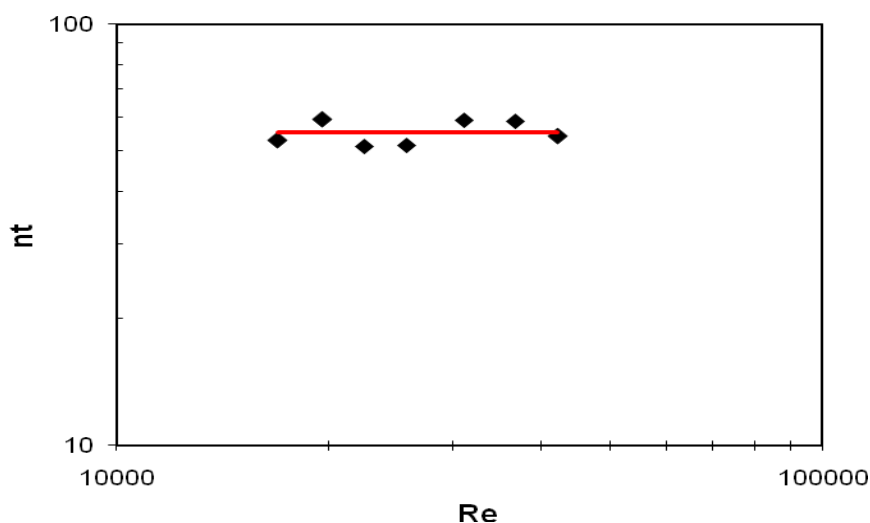
Obr. 14. Závislost Příkonového čísla Po na Re

4.3 Vliv opotřebení lopatek na homogenizační účinky míchadla

Z naměřených a dopočtených hodnot bezrozměrné doby homogenizace byla sestavena tabulka 3 a vytvořen graf viz obr 15. Z výsledků měření je patrné, že v turbulentní oblasti proudění není bezrozměrná doba homogenizace nt_m funkcí Reynoldsova čísla. Dále bylo zjištěno, že se zvyšujícím se opotřebením roste bezrozměrná doba homogenizace.

Tabulka 3. Závislosti bezrozměrné doby homogenizace nt_m na době opotřebení t .

t [hod]	nt_m	
0	41,4	± 2,0
20	46,8	± 4,0
40	50,0	± 3,8
60	54,7	± 4,2
84	55,4	± 3,4



Obr. 15. Závislosti bezrozměrné doby homogenizace nt_m na Re .

4.4 Vliv opotřebení lopatek na suspendační účinky míchadla

V průběhu měření se zaznamenávaly otáčky potřebné k míchání, kdy mrak suspenze dosáhne 90% výšky vsádky a otáčky kdy v nádobě nejsou nepohybující se pevné částice. Z výsledků měření uvedených v tabulce 4 vyplývá, že pro splnění výše uvedených parametrů bylo nutno se zvyšujícím se opotřebením otáčky zvyšovat.

Tabulka 4. Naměřené hodnoty suspendace.

rozměr částic	Ø0,724mm				Ø0,25mm			
koncentrace	2,50%		10%		2,50%		10%	
	v rozích	90% kritérium	v rozích	90% kritérium	v rozích	90% kritérium	v rozích	90% kritérium
20h	875,8	511,4	1182,8	1127,8	613	446,4	763,6	806,8
40h	806,8	434,2	1224,6	1136,8	594	318,8	747,8	801,4
60h	865,6	553,8	1172,2	1113	582	314,4	715,8	812,6
84h	921,4	531,2	1360,8	1227,4	613	307,6	776,2	876,8

5. Závěr:

Byla potvrzena závislost jednotlivých procesních charakteristik na změně tvaru erozivně opotřebovaných lopatek míchadla. Příkonové číslo zůstává konstantní nezávisle na opotřebením. Se zvyšujícím se opotřebením roste bezrozměrná doba homogenizace. Se zvyšujícím se opotřebením rostou otáčky potřebné k míchání suspenze pro dosažení určitého vzhledu částic. Práce bude nadále pokračovat teoretickým rozбором a analýzou těchto prvních výsledků.

Seznam symbolů

b	šířka narážek	[mm]
c_v	střední objemová koncentrace	[%]
C	geometrický parametr opotřebení	[1]
C	výška míchadla ode dna nádoby	[mm]
d_v	střední průměr částic	[mm]
D	průměr míchadla	[mm]
h	výška lopatek	[mm]
H	výška hladiny v nádobě	[mm]
K, k	rychlostní parametr erozivního opotřebení	[1]
l	délka doby homogenizace v grafu	[mm]
M_k	kroutící moment	[Nm]
n	otáčky míchadla	[min ⁻¹]
nt_m	bezrozměrná doba homogenizace	[1]
P_o	příkonové číslo $P_o = \frac{P}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}$	[1]
R, r	poloměr míchadla	[mm]
Re	Reynoldsovo číslo - je číslo, které dává do souvislosti setrvačné síly a viskozitu. Pomocí Re je možné určit, zda je proudění tekutiny laminární, nebo turbulentní. $Re = \frac{n \cdot d^2 \cdot \rho}{\mu}$	[1]

s_0	počáteční tloušťka lopatek	[mm]
t	dobu opotřebení	[hod]
T	průměr nádoby	[mm]
U_k	výška změny vodivosti v grafu	[mm]
y	výška opotřebovaných lopatek	[mm]
α	úhel sklonu lopatek	[°]

Seznam použité literatury

- [1] Fořt, I., Ambros, F., Medek, J.: *Study of wear of pitched blade impellers*. Acta Polytechnica. 2000, vol. 40, no. 5 – 6, s. 11 – 14.
- [2] Jirout, T. - Fořt, I.: *Study of erosion wear of pitched blade impellers in a solid-liquid suspension*. Iżynieria i aparatura chemiczna. 2009, vol.. 48, no. 4, p. 58-59.
- [3] Rieger, F., Novák, V., Jirout, T.: Hydro mechanické procesy II. 2005, ČVUT v Praze, 167 s.