

TLAKOVÉ ÚČINKY AXIÁLNÍCH MÍCHADEL

SEICHTER P., PEŠL L.

TECHMIX s.r.o., Brno, techmix@volny.cz

Při rotaci axiálních míchadel v míchané kapalné vsádce vzniká vlivem tlakových sil od lopatek míchadla převážně axiální proudění. U některých uspořádání je tento tlakový účinek z procesního hlediska velmi důležitý, zejména u míchadel upevněných na míchací nádobu bočně. Důležitost tohoto faktoru pak narůstá se zvyšováním viskozity vsádky, nejvíce u medií jejichž tokové vlastnosti se významně odchylojí od Newtonova viskozitního zákona. V našem příspěvku v CHEMAGAZÍNĚ z r. 2011 [1] byla výhodnost a použití bočních míchadel, tj. míchacích ústrojí se vstupem přes válcovou stěnu nádoby, již rozebírána. Tento příspěvek se zabývá stanovením velikosti axiální síly a parametry ovlivňujícími její výši. Velikost této síly je navíc třeba zohlednit i ve strojním návrhu míchadel.

Rozbor problému

Procesní funkci míchadla je možné charakterizovat pomocí tzv. bezrozměrných kritérií (čísel):

$$- \text{příkonového } Po: \quad Po = P / \rho n^3 d^5 \quad (1)$$

$$- \text{Reynoldsova } Re: \quad Re = n d^2 \rho / \varpi \quad (2)$$

$$- \text{průtokového } Kp: \quad Kp = Q / n d^3 \quad (3)$$

$$- \text{tlakového } Th: \quad Th = F_{ax} / \rho n^2 d^4 \quad (4)$$

Pro stanovení charakteru proudění míchaného media je rozhodující velikost Re . Pro $Re < 10$ je režim laminární s určujícími viskózními silami, pro $Re > 10^4$ se jedná o turbulentní proudění s určujícími setrvačnými silami. Mezi oběma mezími hodnotami jde o přechodový režim, kde se více či méně uplatňují oba typy působících sil.

V turbulentní oblasti při takovém uspořádání, kdy je eliminován efekt gravitačních sil (není krouživý pohyb vsádky a tvorba víru), jsou hodnoty kritérií Kp , Po a Th pro dané geometrické uspořádání míchacího systému konstantní. Mimo tuto oblast jsou však uvedena kritéria závislá, mimo geometrii systému, na velikosti Re .

Mezi kritérii Kp a Th lze nalézt vztah podle [2] a [3]:

$$Th = k_5 Kp^2 \quad (5)$$

kde konstanta k_5 byla v uvedených pracích stanovena experimentálně. Vztah (5) a jeho konstantu je možné odvodit i z rovnováhy impulsu síly a momentu hybnosti.

Stanovení velikosti axiální tahové síly F_{ax} má značný význam při míchání vsádek, jejichž tokové chování se vyznačuje mezí toku, tedy stavem, kdy daná látka již přestává téci. Charakteristickou veličinou tohoto stavu je mezní smykové napětí (yield stress) τ_o . Reologické – tokové vlastnosti takové látky tj. závislost smykového napětí τ na smykové rychlosti Dr je možné vyjádřit např. Binghamovým modelem [4]:

$$\tau = \tau_o + \mu_p D_r \quad (6)$$

nebo Herschel-Bulkeyovým modelem [5]:

$$\tau = \tau_o + K D_r^m \quad (7)$$

Označíme-li si zdánlivou viskozitu μ_A media jako poměr smykového napětí τ a smykové rychlosti D_r ,

$$\mu_A = \tau / D_r \quad (8)$$

pak u obou modelů po překonání hodnoty τ_o , kdy látka začíná téci, se zdánlivá viskozita μ_A snižuje (tekutost se zvyšuje). Příslušné látkové konstanty (τ_o , μ_p , K , m) je třeba stanovit proměřením této látky na reoviskozimetru.

Jak se projeví v aparátu s míchadlem chování uvedené newtonské látky? Pokud míchání není dostatečně intenzivní vytvoří se kolem míchadla dobře míchaná „kaverna“, zatímco ostatní objem vsádky je zcela bez pohybu [6]. Na hraniční ploše této kaverny je smykové napětí právě na úrovni hodnoty τ_o míchaného media.

Pro stanovení velikosti této kaverny (průměr D_c), s cílem zahrnutí celého objemu vsádky do ní, bylo vytvořeno několik výpočtových modelů. Komplexní řešení tohoto problému představil Amanullah et al. [4] vztahem:

$$(D_c/d)^2 = (1/\pi) Re_o [Th^2 + (4 Po / 3\pi)^2]^{0.5} \quad (9)$$

Zde Re_o je modifikované Reynoldsovo číslo pro mezní podmínky toku

$$Re_o = \rho n^2 d^2 / \tau_o \quad (10)$$

Jak je patrné z uvedených vztahů, je pro dosažení celoobjemového promíchávání takové vsádky důležitá jak velikost mezního smykového napětí τ_o , tak mimo velikost příkonu (Po) i velikost tlakové síly axiálního míchadla (Th).

Kterých průmyslových látek se naznačený problém týká? Nejvíce lze výše uvedené odchylky od „standardního“ newtonského chování očekávat u koncentrovaných jemnozrnných suspenzí a u vláknitých suspenzí.

Experimentální část

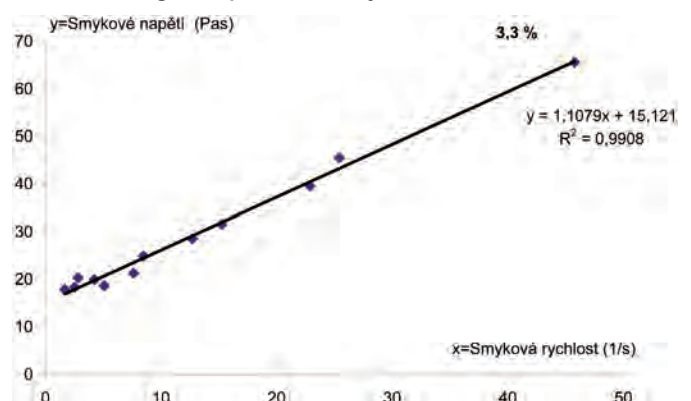
Provedená měření se týkala tří okruhů sledované problematiky:

- stanovení reologických vlastností (vláknitá suspenze),
- proměření příkonu a míchacích účinků v této suspenzi,
- změření tlakových sil axiálních míchadel.

Reologické vlastnosti

Vláknitá suspenze bělené celulózy z Biocel Paskov s koncentrací 3,3% hm. vlákniny byla použita jako modelové medium. Její reologické vlastnosti změřené při teplotě 25 °C na adaptovaném reoviskozimetru Rheotest 2 s rotujícím radiálním míchadlem u dna měřicí nádoby (0,8 l) jsou uvedeny na obr. 1. Kalibrace měřicího míchadla byla provedena na definovaných newtonských a newtonských kapalinách.

Obr. 1 – Reologie suspenze celulózy



Jak je vidět z obr. 1, je zde možné brát zhruba $\tau_o = 15,1$ Pa.

Míchání vláknité suspenze

Míchací zkoušky s touto suspenzí byly prováděny v nádobách $D=300$ a 400 mm s klenutým dnem, kde míchadlo bylo umístěno excentricky (vzdálenost od stěny C). Míchací účinek byl sledován pomocí zjišťování rychlosti pohybu částice unášené na hladině vsádky.

Zkoumaná míchadla: Hydrofoil TX335 (obr.2) a jeho modifikace, dále míchadlo „Majak“ (obr. 3 – míchadlo s tvarovanými lopatkami používané v ruských celulózkách) a vrtulové míchadlo dle CVS 691019 [10] (obr. 4).

Obr. 2



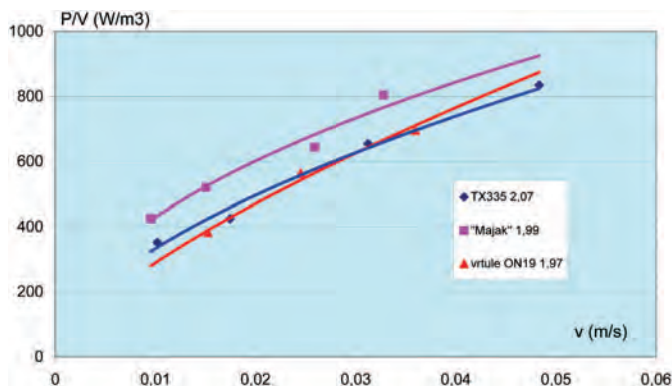
Obr. 3



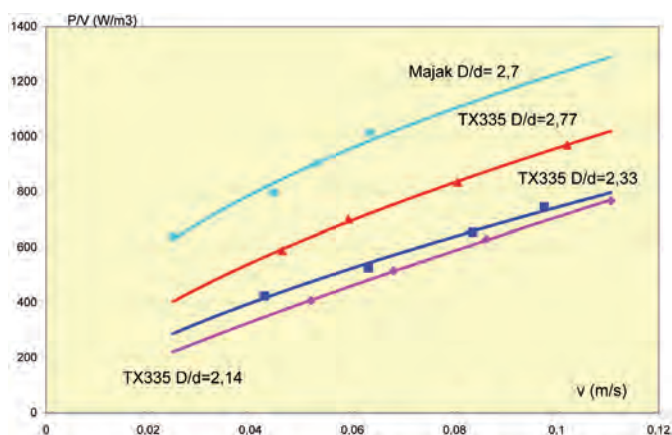
Obr. 4



Obr. 5 – Čerpací výkonnosti míchadel (D = 300 mm)



Obr. 6 – Vliv D/d na spotřebu energie na čerpání (D = 400 mm)



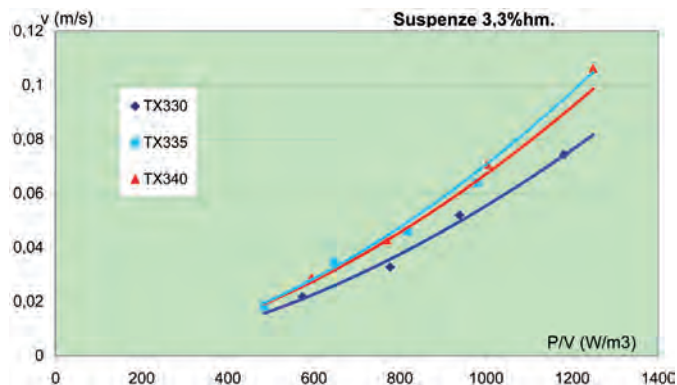
Umístění míchadel (polovina výšky vsádky), průměr míchadel d (přibližně) a vzdálenost C od stěny byly pro všechna míchadla shodné. Zjištěván byl potřebný příkon pro dosažení určité intenzity cirkulace suspenze v nádobě u jednotlivých míchadel. Výsledky v obr. 5, tj. závislost rychlosti proudění v na měrném příkonu P/V ukazují, že míchadlo „Majak“ vyžaduje nejvyšší spotřebu energie a rozdíl mezi oběma dalšími je malý. Je však třeba ještě uvážit jisté zvýhodnění míchadel „Majak“ a vrtule, které byly poněkud většího průměru než TX335 ($D/d=2,07$). Tento fakt je patrný z dalšího obrázku, který ukazuje vliv relativní velikosti míchadla na spotřebu energie. Ukazuje se, že čím je míchadlo větší (nižší hodnota D/d), tím je potřebný příkon pro dosažení stejného čerpacího (i míchacího) účinku nižší. Opět i zde vykazuje míchadlo „Majak“ výrazně horší míchací efekt ve srovnání s míchadlem TX335. Další testy byly věnovány vlivu úhlu sklonu lopatek hydrofoilového míchadla řady TX300. Označení 335 označuje úhel 35° a podobně.

Průběhy závislostí na obr. 7 pro míchání vláknité suspenze ukazují, že při sklonu 35° (TX335) a 40° (TX340) lze dosáhnout lepšího promíchávání než se sklonem 30° (TX330) při zachování shodného měrného příkonu P/V .

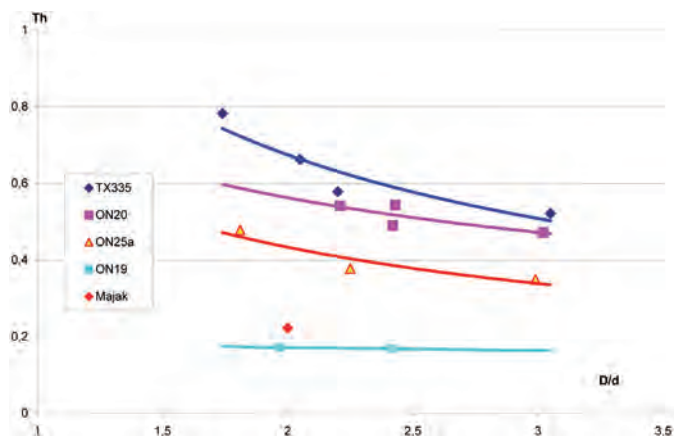
Stanovení tlakové síly

Měření byla prováděna v nádobě $D=300$ mm s plochým dnem, která byla vybavena 4 standardními narážkami u stěny. Axiální míchadla byla umístěna v ose nádoby, čerpání kapaliny směřovalo do dna. Nádoba byla umístěna na elektronické váze (váživost do 30 kg) a reakce dopadajícího proudu kapaliny na dno byla takto snímána. Míchané medium – voda a roztoky glycerolu.

Mimo výše uvedená míchadla byly použity ještě standardní mí-

Obr. 7 – Vliv úhlu lopatek na hodnoty P/V ($D=300$ mm)

chadla CVS 691020 (6lopatkové) a 691025a (3lopatkové) [10]. Byl sledován vliv relativní velikosti míchadel na velikost Th ve vodní vsádce. Jak je patrné, z obr. 7, nejvyšší hodnoty byly zjištěny u hydrofoilového míchadla TX335 a naopak nejnižší u vrtulového míchadla (ON19). Podobně i u míchadla „Majak“.

Obr. 8 – Hodnoty Th axiálních míchadel a vliv relativní velikosti

Aby bylo možné hodnotit efektivitu proměřovaných míchadel, zahrnující spotřebu energie na dosažení tlakového účinku, bylo možné vyjít z čerpací účinnosti EP zavedené Medkem a Fořtem [7]:

$$EP = Kp^3 / Po \quad (11)$$

Při využití vztahu (5) je pak možné stanovit tlakovou efektivitu ET míchadla jako

$$ET = Th^{3/2} / Po \quad (12)$$

Je třeba zdůraznit, že při porovnávání různých typů míchadel je třeba zachovat relativní velikost míchadel a jejich umístění v nádobě. V následující tabulce jsou uvedeny hodnoty ET sledovaných míchadel.

Tab. 1 – Hodnoty ET axiálních míchadel ($D/d=3$)

Míchadlo	Po	Th	ET
TX335	0,94	0,524	0,403
CVS691020	1,76	0,472	0,184
CVS691025a	1,12	0,351	0,186
„Majak“	0,62	0,223	0,170
CVS691019	0,35	0,197	0,250

Pro srovnání lze uvést ještě hodnoty pro speciální míchadlo dodávané fy SULZER pro boční pohony míchadel především pro vláknité suspenze [8]:

$$SLF-80.15D \quad (MX4) \quad 0,64 \quad 0,408 \quad 0,407$$

Jak je vidět, hodnota ET pro TX335 je velmi blízká hodnotě tohoto parametru pro osvědčené míchadlo fy SULZER.

Ostatní testovaná míchadla se již vyznačují značně sníženou schopností vytvářet tlak kapaliny, zejména u míchadel s rovnými lopatkami to nepřekvapuje – stěží by takové řešení bylo možné si představit např. jako náhrada lodního šroubu pro pohon lodí.

Poznámka: Pro porovnání čerpacích účinností (EP) míchadel SLF80 a TX335 podle vztahu (11) lze odhadnout velikost průtokového čísla K_p ze vztahu (5) pomocí konstanty $k_s = 0,84$ platné podle [2] pro široké rozmezí axiálních míchadel:

$$TX335: K_p = [(0,524/0,84)]^{0,5} = 0,79 \quad EP = 0,524$$

$$SLF80: K_p = [(0,408/0,84)]^{0,5} = 0,697 \quad EP = 0,529$$

I v tomto směru hodnocení jsou obě tato míchadla velmi vyrovnaná.

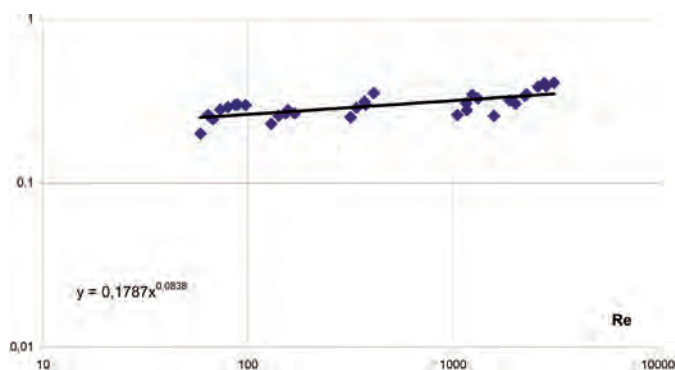
Další testování axiálních sil byly s míchadlem TX335 a CVS691020 prováděny v 5 roztocích glycerolu v rozsahu fyzikálních vlastností:

– dynamická viskozita μ : 770–21 mPas

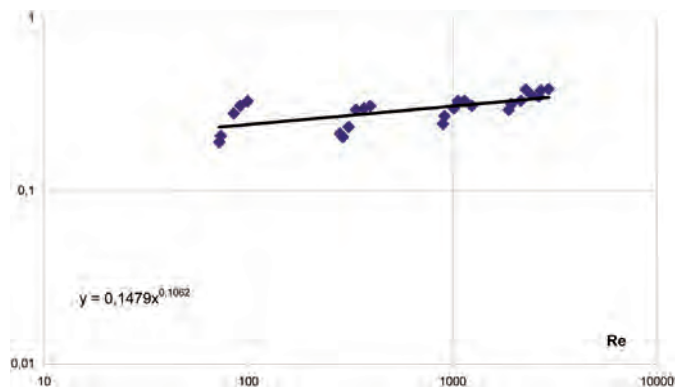
– hustota ρ : 1225–1078 kg/m³

Výsledky v bezrozměrné formě jako závislosti $Th = f(Re)$ jsou představeny na dalších grafech.

Obr. 9 – Závislost $Th = f(Re)$ pro míchadlo TX335



Obr. 10 – Závislost $Th = f(Re)$ pro míchadlo CVS 691020



Z průběhu sledované závislosti pro obě míchadla je patrný mírný pokles Th s poklesem Re (hlavně s nárůstem viskozity media). To je plně v souladu s poklesem čerpacího výkonu míchadel při snižování Reynoldsova čísla, jak bylo zjištěno v publikovaných pracích [9]. Je tedy třeba počítat s tím, že tlaková síla axiálního míchadla bude ve viskózních vsádkách nižší a lze tedy předpokládat, že objem promíchávané „kaverny“ bude také u neneutonských kapalin a suspenzí snížený.

Závěr

Provedené experimentální práce potvrdily, že hydrofoilní míchadlo TX335, které se osvědčilo na celé řadě velkoobjemových průmyslových realizací [11], svými parametry dává dobré předpoklady pro použití i pro míchání vysoce konzistentních suspenzí, včetně vláknitých. Ve srovnání se standardními [10] a některými zahraničními typy axiálních míchadel („Majak“) představuje energeticky velmi úsporné řešení, srovnatelné i se špičkovými výrobky (SULZER).



Křížkova 70
612 00 Brno
tel./fax +420 549 254 992
e-mail: techmix@volny.cz
<http://www.techmix.cz>
Držitel certifikátu ISO 9001 : 2001

MÍCHACÍ ZAŘÍZENÍ A BIOREAKTORY

Zkušební zařízení pro míchání

Umožňuje na zkušební míchání TECHMIX měření:

- vznos suspenze nade dnem (elektrodiffuzní čidla)
- homogenizace (vodivostní čidla)
- otáčky a příkon (tenzometrický měřič kroutícího momentu)
- dispergace v soustavě kapalina-plyn



Obr.2
Modelové zkušební zařízení – MZ2

V rámci grantu MPO: FR-TI1/005 a ve spolupráci s ČVUT Praha je řešena problematika efektivnosti míchadel pro suspenze a k tomu byl vybudován poloprovozní aparát MZ1 (obr.1), umožňující provádět měření s vertikálními i bočními míchadly v poloprovozní nádobě o objemu až 1,8 m³ se sběrem dat na vizualizačním programu PC. Modelové zkoušky a aplikovaný výzkum je možné provádět i na menším podobně vybaveném zkušebním zařízení MZ2 (obr.2) v objemech od 20 lt do 160 lt.

Cílem výzkumu je optimalizace procesu míchání např. použitím inovovaných míchadel nové generace např. hydrofoílů TX 335, 535.

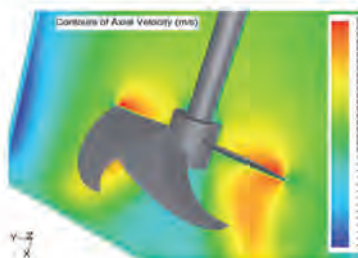
Modelové zkoušky a prováděný výzkum a vývoj umožňují odpovědně navrhovat a dodávat průmyslová míchací ústrojí pro komplikované procesy a u méně složitých případů také významně ušetřit potřebnou energii na míchání.

Souhrn referencí TECHMIX je na výše uvedených internet.stránkách.



Obr.1 Poloprovoz.zařízení – MZ1

Obr.3
Rychlostní pole pro míchadlo TX335 při 300 rpm vytvořené pomocí CFD



Míchadla jsou testována ve zkušebně TECHMIX jednak standardními metodami, dále ve spolupráci se špičkovými pracovišti výzkumu v ČR a také i pomocí výpočetní techniky Computerized Fluid Dynamics – CFD. Obrázek pole axiální složky rychlosti proudění kapaliny je pro míchadlo - hydrofoíl TX335 na obrázku (viz obr.3).

Seznam symbolů

D	průměr nádoby /m/
D_c	výpočtový průměr míchané kaverny /m/
D_r	smyková rychlost /s ⁻¹ /
d	průměr míchadla /m/
EP	čerpací účinnost axiálního míchadla, viz (11)
ET	tlaková účinnost axiálního míchadla, viz (12)
F_{ax}	axiální tlak /N/
H	výška hladiny kapaliny (suspenze) /m/
K	koeficient konzistence média /Pa s ^m /
m	index newtonského toku
n	otáčky míchadla /s ⁻¹ /
P	příkon míchadla /W/
Q	čerpací výkon míchadla /m ³ /s/
μ	dynamická viskozita (index p – plastická) /Pas/
ρ	hustota /kg/m ³ /
τ	smykové napětí (index o – na mezi toku) /Pa/
K_p	průtokové číslo – kritérium, viz (3)
P_o	příkonové číslo – kritérium, viz (1)
Re	Reynoldsovo číslo – kritérium, viz (2)
Re_o	Reynoldsovo číslo – kritérium pro mezní podmínky, viz (10)
Th	tlakové číslo – kritérium, viz (4)

Poděkování: Práce na tomto projektu byly realizovány s finanční podporou fondu Ministerstva průmyslu a obchodu, České republiky (projekt FR-TII/005)

Literatura

- [1] Seichter P., Pešl L.: *Chemagazín*, 2, XXI (2011), p. 32–34
- [2] Uby L.: Paper on *ICHEME FMPSG meeting*, 2001, p. 1–19
- [3] Machado M.B., Nunhez J.R., Nobes D., Kresta M.S.: *AIChE Journal* 2011, Vol. 00, No.0, p. 1–16
- [4] Ulbrecht J., Mitschka P.: Chemické inženýrství newtonských kapalin, *Nakladatelství ČSAV* 1965
- [5] Amanullah A., Hjorth S.A., Nienow A.W.: *Chem.Eng.Sci.* 53, p. 455 (1998)
- [6] Wichterle K., Wein O.: *Chem.Průmysl* 29, p. 113 (1979)
- [7] Medek J., Fořt I.: *Chem.Průmysl* 1979, 29/54, No. 3, p. 116–119
- [8] Product manual fy SULZER „SALOMIX SLF Agitator“
- [9] Tatterson G.B.: *Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks*. Chapter 4, p. 286, vyd. *McGraw-Hill*, Inc. N.Y. (1991)
- [10] Normy míchadel řady CVS (ČSN) 691000
- [11] Seichter P., Pešl L.: *CHEMAGAZÍN*, 2, XV (2005), p.8–11

Abstract

THRUST EFFECT OF AXIAL IMPELLERS

Summary: Various axial impellers were investigated to assess their capacity for mixing of non-Newtonian fluids, particularly fiber suspensions. Hydrofoil stirrer TX335 proved a good ability for this process when compared with standard flat blade impellers or special impeller “Majak” used in Russian cellulose plants. Results of axial force measurement verified very good affectivity of TX335 both from the point of view axial force and pumping capacity when compared with the top level SULZER axial agitator for fiber suspensions.

Keywords: axial stirrer, axial force, agitator effectiveness, fiber suspension