

UDK 66.063.8

Potek homogeniziranja psevdoplastičnih tekočin v posodah z mešalom

MIRKO OPARA

1. Določanje poteka in časa mešanja

Med najrazličnejšimi postopki mešanja tekočin v posodah z mešalom je homogeniziranje medsebojno popolnoma topljivih tekočin najpogostejši. Slabo premešavanje vsebine posode ima lahko v številnih primerih neželene posledice, kakor so nehomogenost produkta, zmanjšanje hitrosti procesa ali reakcije in podobno. Včasih za kakovost mešanja ne postavljamo posebnih zahtev, zato lahko proces homogeniziranja hitreje končamo. Za dobro izvedbo procesov sta torej potek homogeniziranja in potreben čas mešanja zelo pomembna podatka.

Z izrazom *čas mešanja* razumemo tisti čas, ki je potreben, da se prvotna tekočina v posodi in njej dodana tekočina med seboj popolnoma zmešata. Del tekočine, ki jo dodamo prvotni tekočini v mešalni posodi, označimo kot *dodajna tekočina*.

Če tekočina v posodi vsebuje eno, dodajna tekočina pa drugo reakcijsko komponento, se čas, ki je potreben za kemično presnovo, imenuje čas mešanja. Pri tem sta se kot primerni pokazali dve hitri reakciji. Pri nevtralizaciji med NaOH in H_2SO_4 se kot indikator uporablja fenolftalein, pri reakciji med J_2 in $Na_2S_2O_3$ pa škrob. Najprej enakomerno obarvamo tekočino v posodi z zmesjo ene reakcijske komponente in indikatorja. Nato dolijemo dodajno tekočino, ki ji je primešana druga reakcijska komponenta. Zaradi reakcije med obema komponentama barva izginja, zato se ta metoda za določanje časov mešanja imenuje kemična razbarvna metoda. Še nepremešani deli tekočine ostanejo obarvani, že premešani deli tekočine se začnejo svetliti in tako lahko opazujemo napredovanje homogeniziranja in ugotavljamo boljše in slabše mešane cone v tekočini v posodi. Za opazovanje homogeniziranja morajo biti stene posode seveda prozorne. Ko je komponenta, ki jo kaže indikator, popolnoma porabljena, barva izgine in tako lahko natančno določimo trenutek, ko je vsa tekočina homogeno premešana.

Kemična razbarvna metoda trenutno velja za najbolj zanesljivo. Pri njej lahko opazujemo potek mešanja po vsej posodi, medtem ko dajejo tako imenovane fizikalne metode pregled nad dogajanjem samo v posameznih točkah v posodi z mešalom [1]. S kemično razbarvno metodo izmerimo čas, ki je potreben za zmešanje dveh tekočin do ravni molekul.

Za določitev časov mešanja in opazovanje poteka homogeniziranja smo prvotno tekočino v posodi pobarvali najprej temnomodro z raztopino joda in škroba. Drugo reakcijsko komponento — natrijev tiosulfat $Na_2S_2O_3$ — smo primešali dodajni

tekočini in jo vbrizgali v intenzivno mešano območje tekočine v posodi. Dodajna tekočina je imela praktično enako gostoto in viskoznost kakor tekočina v posodi, prostornina dodajne tekočine je znašala okrog 0,5 % prostornine tekočine v posodi.

2. Preizkusne tekočine

V zadnjem času se močno povečuje pomen tekočin, ki se jih ne da popisati z Newtonovim zakonom o tekočinskem trenju:

$$\tau = \eta \frac{dw}{dy} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

kjer so: τ — strižna napetost

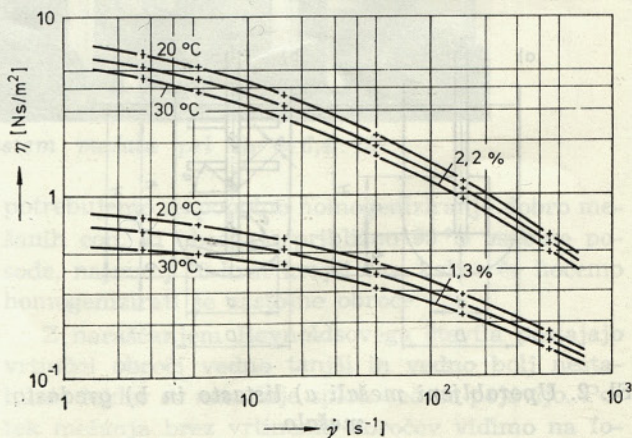
η — dinamična viskoznost

w — hitrost

y — koordinata, pravokotna na smer gibanja

$\dot{\gamma} = dw/dy$ — strižna hitrost

To so nenewtonske tekočine. Njihova viskoznost ni odvisna samo od temperature in deloma od tlaka — kakor je to primer pri (navadnih) newtonskih tekočinah — ampak tudi od strižne hitrosti, včasih pa še od elastičnosti in časa učinkovanja napetosti. V razmeroma veliki družini nenewtonskih tekočin so najbolj razširjene psevdoplastične tekočine, katerih viskoznost je odvisna ne le od temperature, ampak tudi še od strižne hitrosti. Tlačno odvisnost viskoznosti tekočin lahko pri običajnih tehniških okoliščinah zanemarimo. Viskoznost psevdoplastičnih tekočin se manjša z večanjem strižne hitrosti.



Sl. 1. Odvisnost viskoznosti od strižne hitrosti pri psevdoplastičnih tekočinah

Preizkuse za opazovanje homogeniziranja psevdoplastičnih tekočin smo izvedli z vodno raztopino hidroksiletilne celuloze z označbo *tylose H* (proizvajalec: Farbwerke Hoechst AG, Frankfurt/Main). Z zmanjševanjem koncentracije *tylose* v vodi se zmanjšuje viskoznost, prav tako pa se zmanjšuje tudi odvisnost viskoznosti od strižne hitrosti. To je razvidno iz diagrama na sliki 1, kjer je za dve različni koncentraciji *tylose* v vodi prikazana odvisnost viskoznosti od strižne hitrosti pri treh različnih temperaturah. Viskoznost smo merili z rotacijskim viskozimetrom Haake Rotovisco.

Kakor je razvidno s slike 1, odvisnost med viskoznostjo in strižno hitrostjo v dvojnolagaritemski koordinatni mreži ne poteka po premici. Za popis te odvisnosti torej ne moremo uporabiti preprostega potenčnega zakona, ki je znan tudi pod imenom Ostwald-de-Waelejev nastavek [2], in se je v tehniški praksi zaradi preprostosti močno uveljavil:

$$\eta = k \dot{\gamma}^{m-1} \quad (2)$$

kjer sta: k — konsistenčni faktor

m — tekočinski indeks

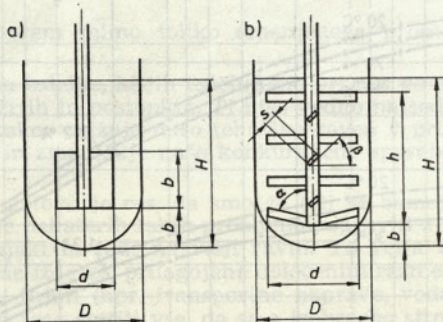
Pri iskanju boljših interpolacijskih polinomov, se je pokazalo, da je zelo primeren naslednji kvadratični polinom:

$$\ln \eta = p_1 + p_2 \ln \dot{\gamma} + p_3 (\ln \dot{\gamma})^2 \quad (3)$$

kjer so p_i — konstante, odvisne od temperature in koncentracije.

3. Preizkusna naprava

Za izvedbo preizkusov sta bili na voljo dve geometrijsko podobni mešalni napravi s steklenimi posodami s polkrožnim dnom.* Notranji premer posode je pri večji napravi znašal 450 mm, pri manjši pa 150 mm. Uporabljali smo listasto in gredasto mešalo v posodi brez motilnikov toka. Mešali vidimo na sliki 2, pripadajoče mere so v tabeli 1.



Sl. 2. Uporabljeni mešali a) listasto in b) gredasto mešalo

* Meritve so bile izvedene pri podjetju Farbwerke Hoechst AG, Frankfurt am Main, za kar se najlepše zahvaljujem.

Tabela 1: Glavne mere uporabljenih mešalnih naprav

Mešalo	$\frac{D}{d}$	$\frac{h}{d}$	$\frac{H}{d}$	$\frac{b}{d}$	$\frac{s}{d}$	α	β
listasto	2,14	1,00	1,5	0,800	—	—	—
gredasto	1,27	1,44	1,5	0,197	0,10	75°	45°

Pri manjši napravi je bilo mogoče spreminjati vrtilno hitrost v območju od 50 do 2800 min⁻¹, pri večji pa od 19 do 1400 min⁻¹. S spreminjanjem vrtilne hitrosti, viskoznosti in gostote preizkusne tekočine in izbiro med različno velikima eksperimentalnima napravama je bilo mogoče obratovati pri zelo različnih Reynoldsovih številih.

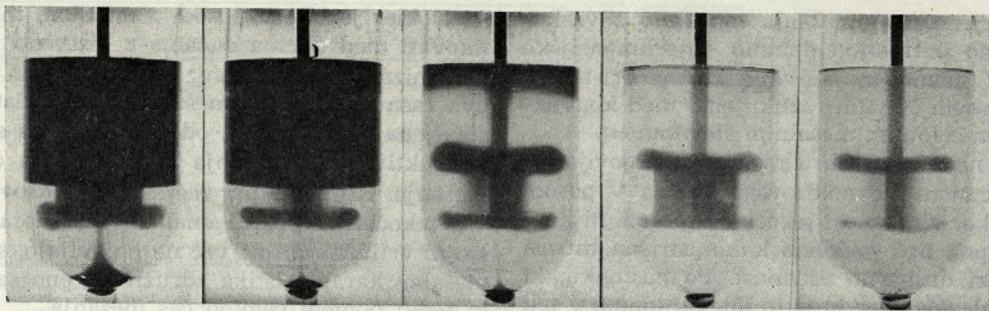
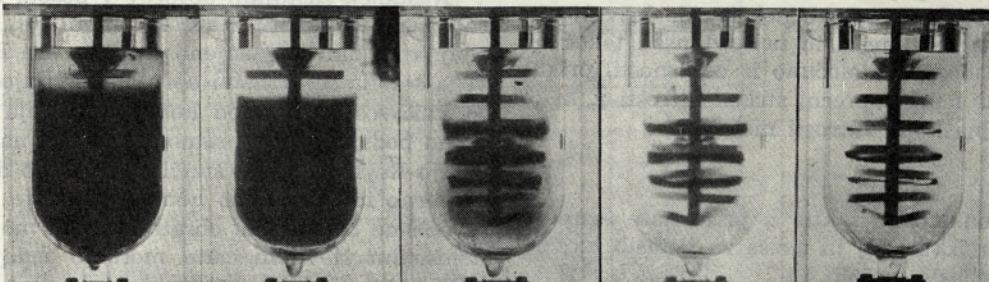
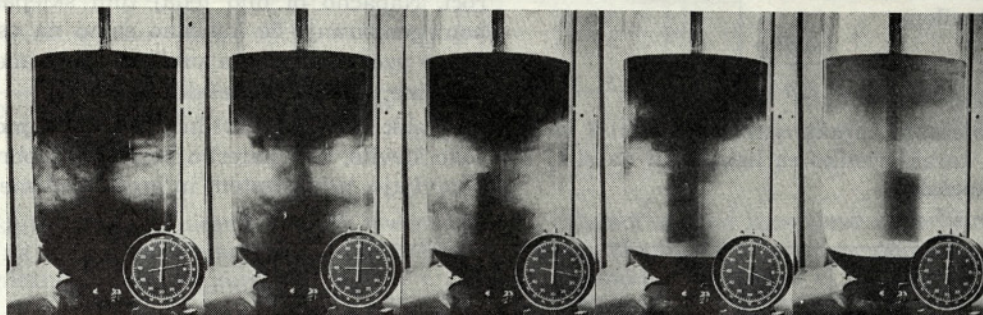
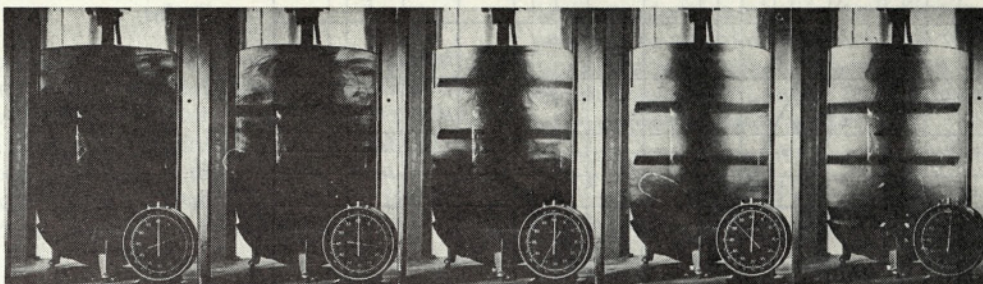
4. Potek mešanja pri listastem in gredastem mešalu

Če opazujemo potek mešanja s kemično razbarvno metodo, lahko opazimo v mešani tekočini pri majhnih Reynoldsovih številih področja z zelo različno hitrostjo premešavanja oziroma homogeniziranja. Slabše mešane cone imajo obliko vrtničnih obročev, ki ostanejo temni še dolgo po tem, ko se preostali dobro premešani deli tekočine že popolnoma razbarvajo.

Zaradi vpliva radialne komponente hitrosti, nastaneta pri listastem mešalu v posodi dve območji tečenja, ki ju med sabo deli vodoravna, nekako skozi sredino lista mešala potekajoča ravnina. Potek premešavanja je odvisen od višine, pri kateri vbrizgavamo dodatno tekočino s primešano drugo reakcijsko komponento. To se lepo vidi iz fotografskih posnetkov na sliki 3, kjer je bila dodatna tekočina vbrizgana v spodnjo polovico posode, ki se je zaradi tega tudi najprej razbarvala. Barva pa ne izgine v celotnem spodnjem območju tekočine hkrati, ampak ostane v njej še naprej močno temno pobarvan zastojni vrtnični obroč. Izmenjava med spodnjim in zgornjim območjem tekočine je razmeroma intenzivna, tako da se po relativno kratkem času razbarva tudi zgornji del tekočine, v katerem pa zopet ostane pobarvan zastojni obroč. Zaradi hitrega razbarvanja imenujemo oba dela tekočine brez vrtničnih obročev dobro mešano cono.

Podobno kakor pri listastem mešalu poteka homogeniziranje tudi pri gredastem mešalu, samo da se tu ne pojavljata samo dva vrtnična obroča, ampak po eden med dvema sosednjima ročicama mešala (sl. 4).

Pri homogeniziranju dobro mešanih in zastojnih con lahko opazimo dva različna izravnalna procesa. Barva v celotni dobro mešani coni izgine naenkrat, kar je posledica dobrega konvektivnega mešanja celotne cone. Po trenutnem razbarvanju dobro mešane cone lahko natančno določimo čas dokončanja homogeniziranja te cone. Ta čas mešanja označimo kot konvektivni čas mešanja.

Sl. 3. Potek mešanja pri listastem mešalu pri $Re = 110$ Sl. 4. Potek mešanja pri gredastem mešalu pri $Re = 430$ Sl. 5. Potek mešanja pri listastem mešalu pri $Re = 2,2 \cdot 10^4$ Sl. 6. Potek mešanja pri gredastem mešalu pri $Re = 6,4 \cdot 10^3$

Razbarvanje zastojnih con — vrtničnih obročev — poteka drugače. Celoten obroč se ne razbarva naenkrat, ampak najprej njegovi zunanji sloji zaradi snovne izmenjave z okolišno dobro mešano tekočino. Obroč postaja vedno drobnejši. Razbarvanje vrtničnih obročev poteka podobno kakor difuzijski procesi. Čas, ki je potreben za homogeniziranje celotne vsebine posode vključno z vrtničnimi obroči, imenujemo celoten čas mešanja.

Razmerje med celotnim in konvektivnim časom mešanja znaša pri listastem mešalu okrog 12, pri gredastem mešalu pa približno 10. To pomeni, da

potrebujemo za popolno homogeniziranje dobro mešanih con, ki obsegajo približno 95 % vsebine posode, najmanj 10-krat krajši čas, kakor če hočemo homogenizirati še zastojne obroče.

Z naraščanjem Reynoldsovega števila postajajo vrtnični obroči vedno tanjši in vedno bolj nestabilni, dokler se nazadnje sploh več ne pojavijo. Potek mešanja brez vrtničnih obročev vidimo na fotografskih posnetkih na sliki 5 za listasto in na sliki 6 za gredasto mešalo. Tu seveda lahko izmerimo samo celotni čas mešanja.

Če izmerjene čase mešanja množimo z vsakokratno kotno hitrostjo, dobimo brezdimenzijske produkte ωt , imenovane *mešalna števila*. Pri manjših Reynoldsovih številih razlikujemo med konvektivnim ωt_k in celotnim mešalnim številom ωt .

Pri vseh nenewtonskih tekočinah se pojavlja težava z izračunom Reynoldsovega števila v posodi z mešalom, ker viskoznost tekočine v posodi ni konstantna, ampak ima podobno kakor strižna hitrost v vsaki točki drugačno vrednost. Po postopku, ki sta ga izdelala Metzner in Otto [3], računamo v teh primerih z neko poprečno viskoznostjo $\bar{\eta}$, ki je definirana tako, da dosežemo pokrivanje krivulj porabe moči za newtonske in nenewtonske tekočine. Poprečno viskoznost določimo iz odvisnosti, prikazane na sliki 1 pri poprečni strižni hitrosti $\dot{\gamma}$, ki je proporcionalna kotni hitrosti mešala ω :

$$\dot{\gamma} = \kappa \omega \quad (4)$$

Proporcionalnostni faktor κ je za naše razmere določen s preizkusi [4] in znaša za listasto mešalo 2,5 in za gredasto mešalo 4,1.

Odvisnost med mešalnim številom ωt in Reynoldsovim številom

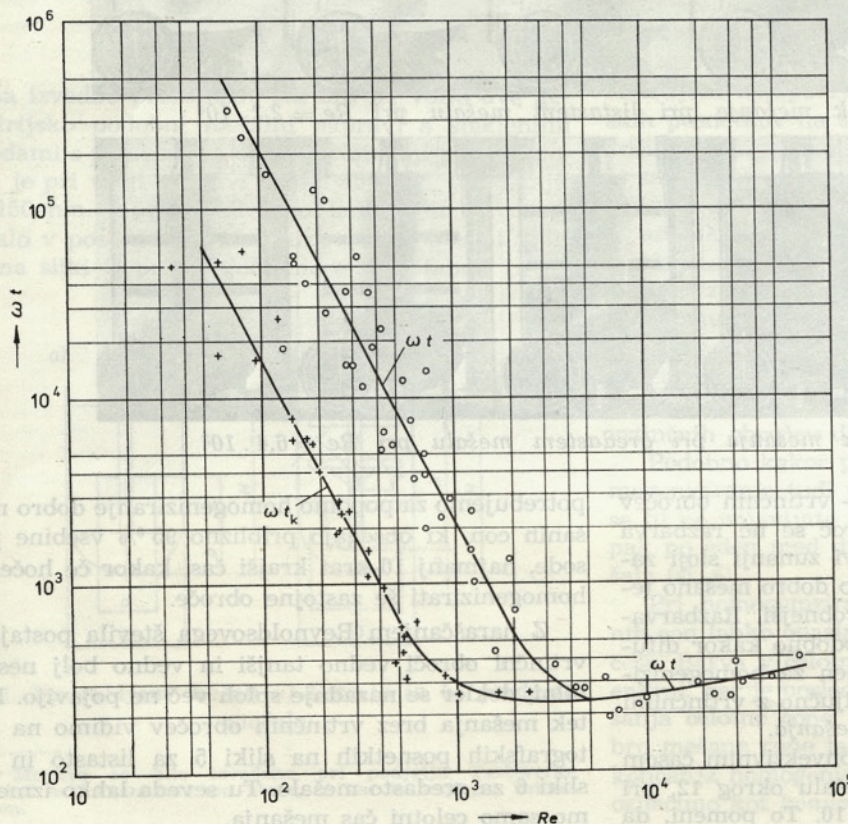
$$Re = \frac{\omega d^2 \rho}{\bar{\eta}} \quad (5)$$

imenujemo *mešalna karakteristika*. Na sliki 7 vidimo mešalno karakteristiko za listasto in na sliki 8 za gredasto mešalo.

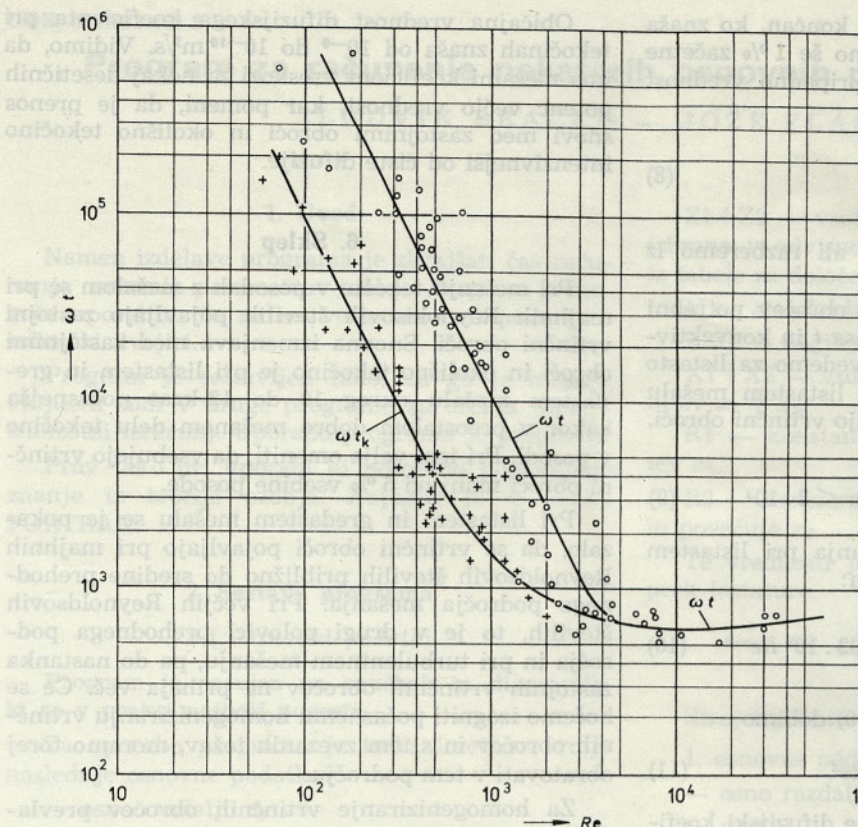
Dokler je bilo v posodi z mešalom mogoče razlikovati med dvema conama z bistveno različnima mehanizmoma homogeniziranja, sta bila izmerjena dva časa mešanja in mešalna karakteristika je sestavljena iz dveh linij, od katerih velja spodnja za konvektivni čas mešanja in zgornja za celotni čas mešanja. Ko pa se pri večjih Reynoldsovih številih vsa tekočina v posodi enakomerno meša in se zastojni vrtnični obroči več ne pojavljajo, se obe veji mešalne karakteristike združita v eno samo linijo, ki tedaj pomeni celoten čas mešanja.

Nastanek zastojskih obročev v posodi z mešalom so opazovali še drugi avtorji [5] in [6], vendar za zdaj še ni bilo razjasnjeno, do katerega Reynoldsovega števila se vrtnični obroči pojavljajo. To pa je za kakovostno izvedbo homogeniziranja zelo dragocen podatek, saj moramo obratovati nad to vrednostjo Reynoldsovega števila, če želimo doseči enakomerno in intenzivno homogeniziranje. Vedno pa seveda ne bo mogoče obratovati nad mejnim Reynoldsovim številom, zato moramo tedaj počakati toliko časa, da se homogenizirajo tudi vrtnični obroči. Napačno bi bilo tedaj tudi sklepanje, da je homogeniziranje že končano samo na osnovi raziskave vzorca, ki bi ga vzeli iz dobro mešane cone tekočine v posodi z mešalom.

S slik 7 in 8 je razvidno, da ima mejno Reynoldsovo število, nad katerim se vrtnični obroči več ne pojavljajo, pri listastem in gredastem mešalu prak-



Sl. 7. Mešalna karakteristika za listasto mešalo



Sl. 8. Mešalna karakteristika za gredasto mešalo

tično enako vrednost, in sicer $5 \cdot 10^3$. Ta vrednost je približno na sredini prehodnega področja mešanja, ki je definirano po krivulji porabe moči [7].

5. Prenos snovi med vrtničnimi obroči in okolišno tekočino

Prenos snovi med prvotno tekočino v posodi in dodano tekočino je z mešalnimi karakteristikami zadovoljivo opisan. Ostane pa odprto vprašanje, kakšen je pravzaprav izravnalni proces med vrtničnimi obroči in preostalo tekočino v posodi z mešalom, za katerega se navadno predpostavlja, da je podoben difuziji, ali pa da poteka kot čisti difuzijski proces.

Pri raziskavi izmenjave med vrtničnim obročem in okolišno tekočino izhajamo iz modela čiste difuzije. Pri tem si zastojni obroč zamislimo raztegnjen v neskončni valj, pri katerem se v vzdolžni smeri ne pojavljajo razlike koncentracij. Za ta primer velja znana difuzijska enačba:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right) \quad (6)$$

kjer so:

- c — koncentracija
- t — čas
- D — difuzijski koeficient
- r — polmer zastojnega vrtničnega obroča

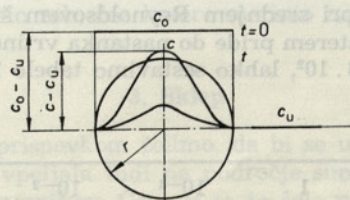
Zaradi snovne izmenjave z okolišno tekočino se koncentracija v zastojnem obroču zmanjšuje od neke začetne vrednosti c_0 do popolne izenačitve s koncentracijo c_u v okolišni tekočini. Ta pojav je skiciran na sliki 9. Zaradi enostavnosti vzamemo, da je prostornina okolišne tekočine v primerjavi s prostornino zastojnih obročev tako velika, da ostane njena koncentracija nespremenjena. Pri teh okoliščinah dobimo po Lykovu [8] za koncentracijo c na osi vrtničnega obroča rešitev:

$$\frac{c - c_u}{c_0 - c_u} = \sum \frac{2}{\mu_n} \left(\frac{1}{J_1(\mu_n)} \right) \exp \left(-\mu_n^2 \frac{Dt_0}{r^2} \right) \quad (7)$$

kjer sta:

$J_1(\mu_n)$ — Besselova funkcija in

μ_n — njen n -ti koren



Sl. 9. Spreminjanje koncentracij v vrtničnem obroču

Vzamemo, da je prenos snovi končan, ko znaša razlika koncentracije $c - c_u$ samo še 1 % začetne razlike $c_0 - c_u$. Tej vrednosti pripadno vrednost brezdimenzijskega števila

$$\frac{Dt_0}{r^2} = 0,85 \quad (8)$$

lahko izračunamo iz enačbe (7) ali razberemo iz ustrezne tabele v [8].

Za homogeniziranje zastoynih obročev potrebni čas t_0 je enak razliki celotnega časa t in konvektivnega časa mešanja t_k . Izračun izvedemo za listasto mešalo. Celotni čas mešanja pri listastem mešalu lahko v območju, kjer se pojavljajo vrtnični obroči, opišemo z enačbo:

$$\omega t = 2,1 \cdot 10^9 \cdot Re^{-2}, \quad Re < 3 \cdot 10^3 \quad (9)$$

Ker je konvektivni čas mešanja pri listastem mešalu dvanajstkrat manjši, velja:

$$\omega t_0 = \omega t - \omega t_k = \frac{11}{12} \omega t = 1,92 \cdot 10^9 Re^{-2} \quad (10)$$

S kombinacijo enačbe (8) in (10) dobimo

$$D = 4,4 \cdot 10^{-10} \omega r^2 Re^2 \quad (11)$$

Iz zgornje enačbe vidimo, da je difuzijski koeficient odvisen od Reynoldsovega števila, torej od hidrodinamičnih razmer v posodi z mešalom. Prenos snovi med zastoynim obročem in okolišno tekočino torej ne poteka s čisto difuzijo, ampak prispeva tudi tako imenovana turbulentna difuzija. Koeficient D bomo zato imenovali mešalni koeficient in ga označili z indeksom »m«.

Polmer zastoynega obroča je odvisen od velikosti mešalne posode oziroma premera mešala in Reynoldsovega števila. Na osnovi številnih fotografskih posnetkov opravljenih preizkusov z listastim mešalom je mogoče izvesti naslednjo zvezo:

$$\frac{r}{d} = 3 Re^{-0,75} \quad (12)$$

Vstavimo v enačbo (11) in dobimo

$$\frac{D_m}{\nu} = 4 \cdot 10^{-9} Re^{3/2} \quad (13)$$

Če sedaj izračunamo vrednosti mešalnega koeficienta D_m pri srednjem Reynoldsovem številu območja, v katerem pride do nastanka vrtničnih obročev, $Re = 3 \cdot 10^2$, lahko sestavimo tabelo 2.

Tabela 2

ν m ² /s	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}
D_m m ² /s	$2,1 \cdot 10^{-5}$	$2,1 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-7}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$

Običajna vrednost difuzijskega koeficienta pri tekočinah znaša od 10^{-9} do 10^{-10} m²/s. Vidimo, da ima mešalni koeficient vseskozi za nekaj desetičnih potenc večjo vrednost, kar pomeni, da je prenos snovi med zastoynimi obroči in okolišno tekočino intenzivnejši od čiste difuzije.

6. Sklep

Pri mešanju tekočin v posodah z mešalom se pri majhnih Reynoldsovih številih pojavljajo zastoyni vrtnični obroči. Snovna izmenjava med zastoynimi obroči in okolišno tekočino je pri listastem in gredastem mešalu okrog 10 do 12-krat počasnejša kakor v preostalem dobro mešanem delu tekočine v posodi. Pri tem velja omeniti, da vsebujejo vrtnični obroči manj od 5 % vsebine posode.

Pri listastem in gredastem mešalu se je pokazalo, da se vrtnični obroči pojavljajo pri majhnih Reynoldsovih številih približno do sredine prehodnega področja mešanja. Pri večjih Reynoldsovih številih, to je v drugi polovici prehodnega področja in pri turbulentnem mešanju, pa do nastanka zastoynih vrtničnih obročev ne prihaja več. Če se hočemo izogniti počasnemu homogeniziranju vrtničnih obročev in s tem zvezanih težav, moramo torej obratovati v tem področju.

Za homogeniziranje vrtničnih obročev prevladuje mnenje, da je podobno difuziji. Z ovrednotenjem številnih fotografskih posnetkov je bilo mogoče sklepati, da je proces homogeniziranja intenzivnejši od čiste difuzije, saj so ustrezni mešalni koeficienti za nekaj desetičnih potenc večji od difuzijskih koeficientov v tekočinah.

LITERATURA

- [1] Zlokarnik, M.: Eignung von Rührern zum Homogenisieren von Flüssigkeitsgemischen. Chem.-Ing.-Techn., 39 (1967) 9/10, str. 539/548.
- [2] Brauer, H.: Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenströmungen. Verlag Sauerländer Aarau/Frankfurt (M), 1971.
- [3] Metzner, A. B., Otto, R. E.: Agitation of non-Newtonian Fluids. A. I. Ch. E.-J., 3 (1957) 1, str. 3/11.
- [4] Opara, M.: Homogenisieren von nicht-Newtonischen Flüssigkeiten im Rührgefäß. Verfahrenstechnik, 9 (1975) 9, str. 446/449.
- [5] Ullrich, H., Schreiber, H.: Rühren in zähen Flüssigkeiten. Chem.-Ing.-Techn., 39 (1967) 5/6, str. 218/224.
- [6] Müller, W.: Auswahl und Auslegung von Rührern zum Mischen zäher Medien. Dechema Monographien 66, str. 247/274.
- [7] Opara, M.: Poraba moči pri mešanju tekočin v posodi z mešalom. Strojniški vestnik, 21 (1975) 11/12, str. 233/238.
- [8] Lykov, A. V. Teorija toplotoprednosti. Vysšaja škola. Moskva 1967.

Avtorjev naslov: doc. dr. Mirko Opara
Fakulteta za strojništvo
Univerze v Ljubljani