

UDK 66.063

Poraba moči pri mešanju tekočin v posodi z mešalom

MIRKO OPARA

1. UVOD

Mešanje tekočin je ena od najbolj razširjenih operacij procesne tehnike. Z mešanjem želimo pospeševati prenos snovi med sestavinami znotraj mešalne posode ali pa pospeševati izmenjavo toplote z okolico. Najpogostejše naloge mešanja so:

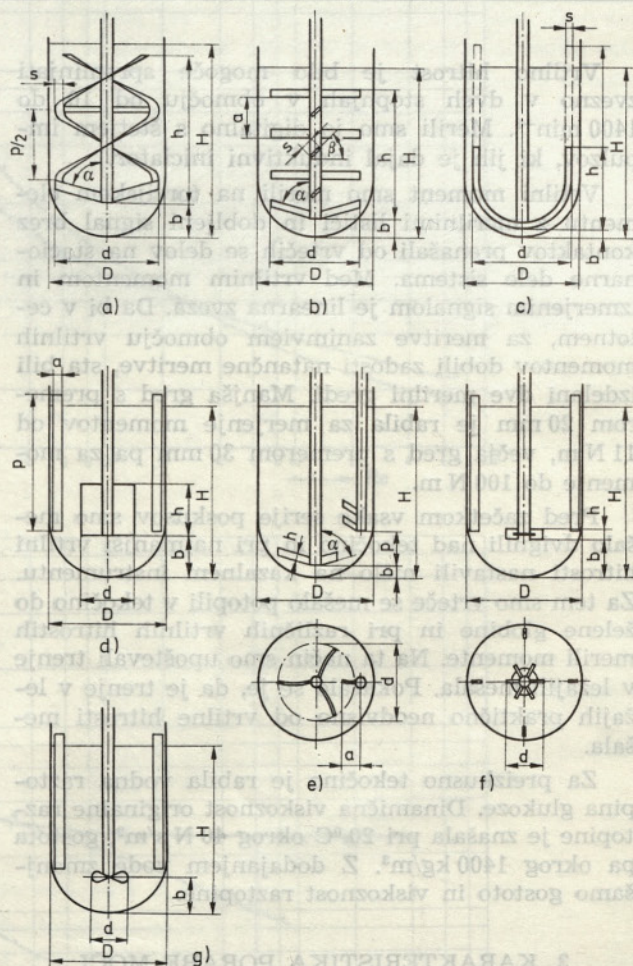
- homogeniziranje tekočin, ki se dobro mešajo,
- raztapljanje trdnih delcev,
- dispergiranje plinov v tekočine,
- emulgiranje tekočin, ki se ne mešajo,
- suspendiranje trdnih delcev v tekočini,
- prenos toplote med tekočino in steno posode ali steno vgrajenega cevne sistema.

Pri vsakem mešanju je vedno zanimiva poraba moči za pogon mešala. Velika večina dosedanjih raziskav porabe moči je bila izvedena v posodah z ravnim dnom in za primere, ko je bila višina tekočine v posodi enaka premeru posode [1]. Rezultatov teh raziskav ne smemo prenašati na drugačne oblike in velikosti mešalnih sistemov, ali pa le z največjo previdnostjo. Zaradi tega smo merili porabo moči pri mešanju tekočin v posodah s polkroglim dnom. Porabo moči smo izmerili za sedem različnih mešal v posodah z motilniki toka ali brez njih. Razmerje med višino tekočine in premerom posode je praviloma znašalo 1,5:1.

2. EKSPERIMENTALNA NAPRAVA IN IZVEDBA POSKUSOV

Za izvedbo poskusov je bila na voljo eksperimentalna naprava*, pri kateri je bilo mogoče spreminjati razdaljo mešala od dna posode in mešalo celo dvigniti nad tekočino. Mešalna posoda je imela premer 450 mm in je navadno vsebovala okrog 100 l tekočine. Uporabljali smo naslednje tipe mešal: vijačno, gredasto, sidrasto, listasto, impellersko, turbinsko in propellersko. Mešala so prikazana na sliki 1; glavne mere pa so razvidne iz razpredelnice 1.

* Meritve je omogočila firma Farbwerke Hoechst AG, Frankfurt am Main, ki se ji za to pomoč najlepše zahvaljujem.



Sl. 1. Mešala

- vijačno
- gredasto
- sidrasto v dolgi in kratki izvedbi
- listasto
- impellersko
- turbinsko in
- propellersko trilizno mešalo

Razpredelnica 1: Glavne mere uporabljenih mešal

Mešalo	d mm	$\frac{D}{d}$	$\frac{h}{d}$	$\frac{H}{D}$	$\frac{b}{d}$	$\frac{s}{d}$	$\frac{p}{d}$	$\frac{a}{d}$	α	β
vijačno	420	1,07	1,43	1,7	0,322	0,083	1,31	—	15°	—
gredasto	355	1,27	1,44	1,5	0,197	0,100	—	0,24	15°	45°
sidrasto — dolgo	405	1,11	2,25	1,5	0,062	0,062	—	—	—	—
sidrasto — kratko	400	1,13	0,73	1,5	0,063	0,063	—	—	—	—
listasto	210	2,14	1,00	1,5	0,800	—	2,45	0,214	—	—
impelersko	290	1,55	0,12	1,5	0,155	—	0,40	0,40	15°	—
turbinsko	153	2,94	0,33	1,5	1,50	—	3,36	0,294	—	—
propelersko	150	3,00	—	1,5	1,50	—	3,44	0,30	—	—

Vrtilno hitrost je bilo mogoče spreminjati zvezno v dveh stopnjah v območju od 10 do 1400 min⁻¹. Merili smo jo digitalno s štetjem impulzov, ki jih je dajal induktivni iniciator.

Vrtilni moment smo merili na torzijskem elementu z merilnimi lističi in dobljeni signal brez kontaktov prenašali od vrtečih se delov na stacionarne dele sistema. Med vrtilnim momentom in izmerjenim signalom je linearna zveza. Da bi v celotnem, za meritve zanimivem območju vrtilnih momentov dobili zadosti natančne meritve, sta bili izdelani dve merilni gredi. Manjša gred s premerom 20 mm je rabila za merjenje momentov od 11 N m, večja gred s premerom 30 mm pa za momente do 100 N m.

Pred začetkom vsake serije poskusov smo mešalo dvignili nad tekočino in pri najmanjši vrtilni hitrosti nastavili ničlo na kazalnem instrumentu. Za tem smo vrteče se mešalo potopili v tekočino do želene globine in pri različnih vrtilnih hitrostih merili momente. Na ta način smo upoštevali trenje v ležajih mešala. Pokazalo se je, da je trenje v ležajih praktično neodvisno od vrtilne hitrosti mešala.

Za preizkusno tekočino je rabila vodna raztopina glukoze. Dinamična viskoznost originalne raztopine je znašala pri 20 °C okrog 40 N s/m², gostota pa okrog 1400 kg/m³. Z dodajanjem vode zmanjšamo gostoto in viskoznost raztopine.

3. KARAKTERISTIKA PORABE MOČI

Pod izrazom *karakteristika porabe moči* razumemo zvezo med brezdimenzijskimi števili, s katero je podana odvisnost iskane veličine — moči — od kinematičnih, snovnih in geometrijskih parametrov [2]. Razmerja med geometrijskimi merami mešal in posode se pri izvedenih poskusih niso spreminjala, zato lahko porabo moči popišemo z odvisnostjo med Newtonovim in Reynoldsovim ter Froudovim številom. Ta brezdimenzijska števila so za potrebe mešanja tekočin v posodah z mešalom definirana na naslednji način [1]:

$$\text{Newtonovo število } Ne = \frac{P}{\omega^3 d^5 \rho} \quad (1)$$

$$\text{Reynoldsovo število } Re = \frac{\omega d^2 \rho}{\eta} \quad (2)$$

$$\text{Froudovo število } Fr = \frac{\omega^2 d}{g} \quad (3)$$

kjer pomenijo:

P — moč, potrebno za pogon mešala,

ω — kotno hitrost mešala,

d — premer mešala,

ρ — gostoto tekočine,

η — dinamično viskoznost,

g — zemeljski pospešek.

Namesto v literaturi običajne vrtilne hitrosti n uprabljamo v zgornjih brezdimenzijskih številih kotno hitrost ω . Ker lahko moč zapišemo kot produkt vrtilnega momenta M in kotne hitrosti ω , tudi velja:

$$Ne = \frac{P}{\omega^3 d^5 \rho} = \frac{M}{\omega^2 d^5 \rho} \quad (4)$$

Če bi Newtonovo število definirali z vrtilno hitrostjo n , bi se v enačbi (4) pojavil še faktor 2π

$$Ne_n = (2\pi)^3 Ne = \frac{P}{n^3 d^5 \rho} = 2\pi \frac{M}{n^2 d^5 \rho} \quad (5)$$

Samo pri računanju s kotno hitrostjo se izognemo za podobnostno teorijo nepomembni konstanti 2π , s katero sta povezani kotna in vrtilna hitrost, $\omega = 2\pi n$.

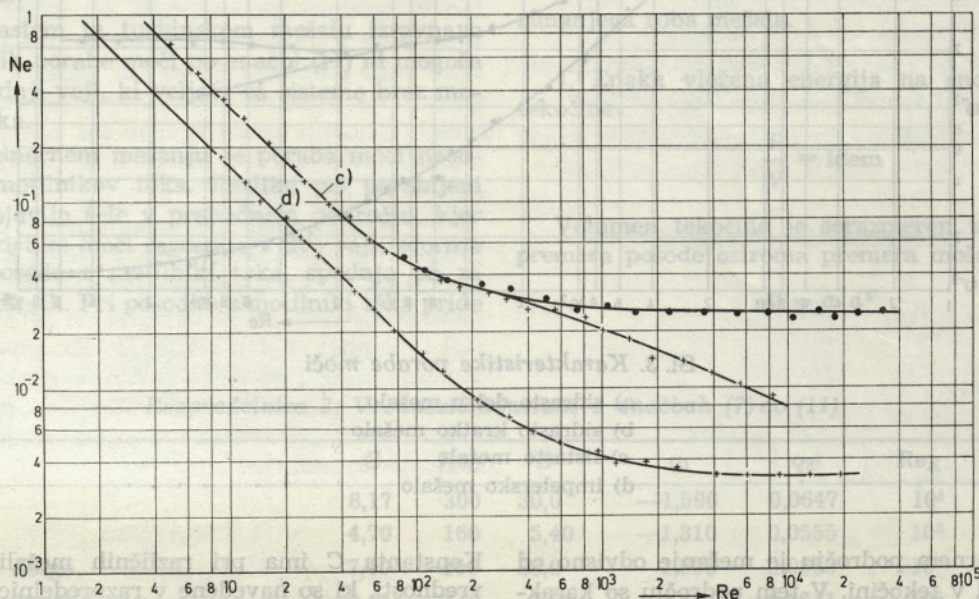
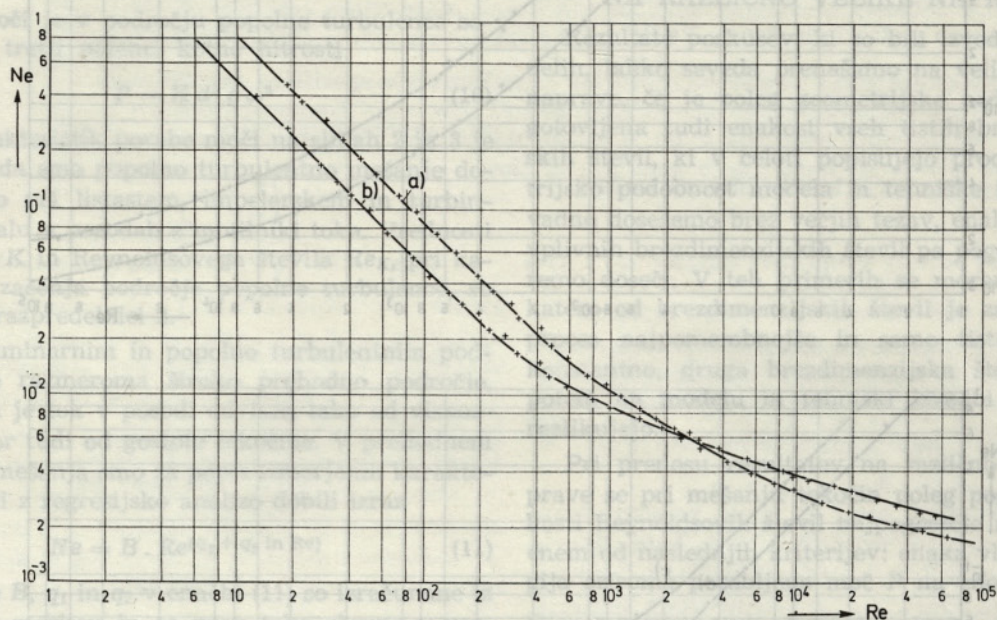
Pri velikih Reynoldsovih in Froudovih številih nastane v preskusni tekočini vrtnični lijak, ki zmanjša porabo moči, ker je mešalo samo deloma potopljeno v tekočino. Takšnih tokovnih stanj nismo opazovali in smo meritve opravljali samo pri neznatnih vrtničnih lijakih. Pri tokovnih stanjih,

ki bi vodila k nastanku večjih vrtničnih lijakov, smo uporabljali motilnike toka. Po tako izvedenih poskusih ni bilo mogoče zaznati vpliva Froudovega števila na porabo moči. Izmerjene karakteristike porabe moči lahko opišemo z odvisnostjo med Newtonovim in Reynoldsovim številom

$$f(Re, Ne) = 0$$

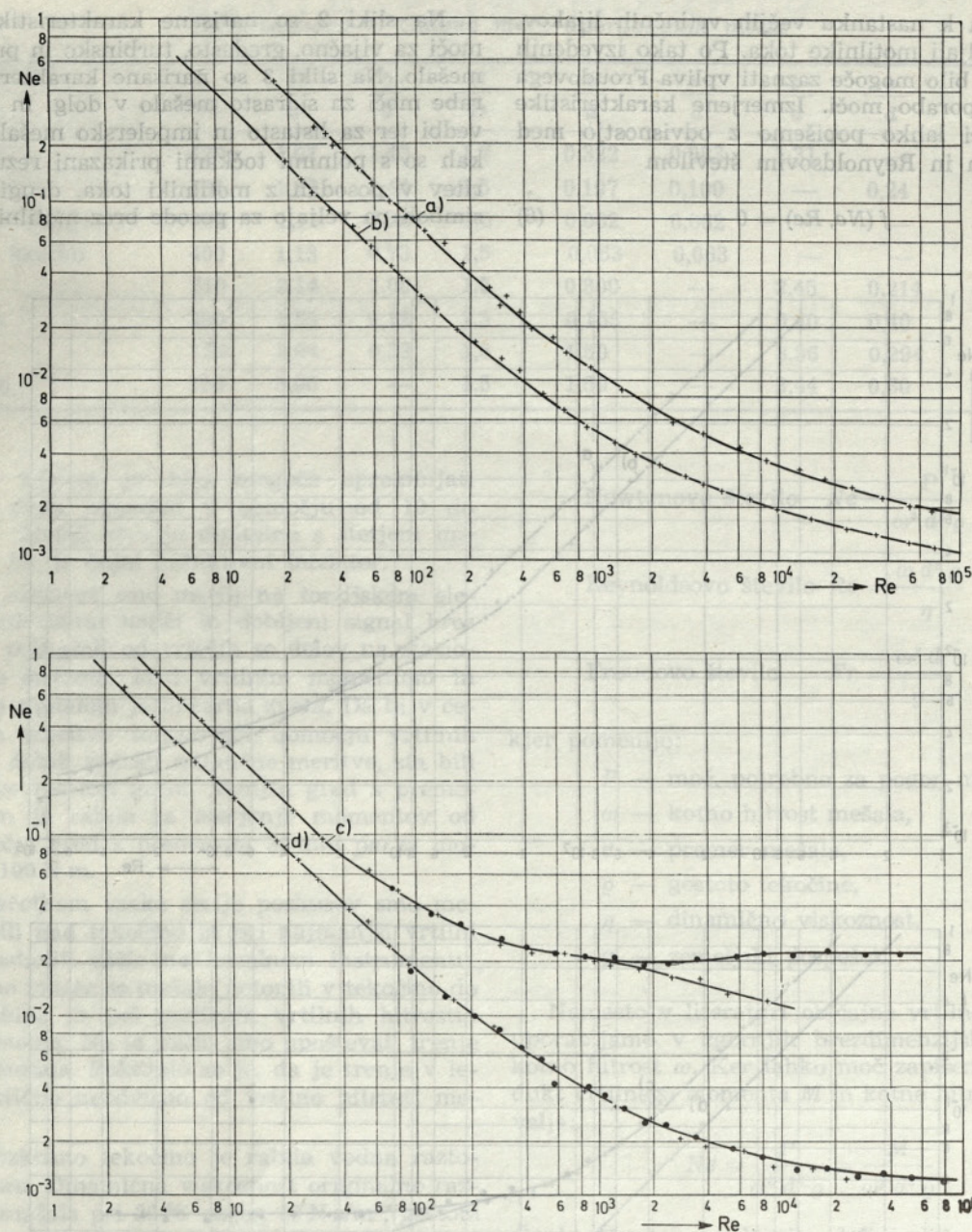
(6)

Na sliki 2 so narisane karakteristike porabe moči za vijačno, gredasto, turbinsko in propellersko mešalo. Na sliki 3 so narisane karakteristike porabe moči za sidrasto mešalo v dolgi in kratki izvedbi ter za listasto in impellersko mešalo. Na slikah so s polnimi točkami prikazani rezultati meritev v posodah z motilniki toka, drugi točkovni simboli pa veljajo za posode brez motilnikov.



Sl. 2. Karakteristike porabe moči

- a) vijačno mešalo
- b) gredasto mešalo
- c) turbinsko mešalo
- d) propellersko mešalo



Sl. 3. Karakteristike porabe moči

- a) sidrasto dolgo mešalo
- b) sidrasto kratko mešalo
- c) listasto mešalo
- d) impersko mešalo

V laminarnem področju je mešanje odvisno od viskoznih sil v tekočini. V tem področju so karakteristike porabe moči v dvojnologaritemski koordinatni mreži premice z naklonom -1 . Popišemo jih z enačbo

$$Ne = \frac{C}{Re} \quad (7)$$

Konstanta C ima pri različnih mešalih različne vrednosti, ki so navedene v razpredelnici 2. V razpredelnici je napisano tudi Reynoldsovo število Re_c , ki navzgor omejuje laminarno področje mešanja.

Če v enačbo (7) vstavimo ustrezna izraza za Newtonovo in Reynoldsovo število, vidimo, da je poraba moči mešala v laminarnem področju sorazmerna kvadratu kotne hitrosti

$$P = C d^3 \eta \omega^2 \quad (8)$$

V področju popolno turbulentnega mešanja je poraba moči neodvisna od viskoznosti in s tem neodvisna od Reynoldsovega števila. Newtonovo število je tu približno konstantno

$$Ne = \frac{P}{\omega^3 d^5 \rho} = K \quad (9)$$

Poraba moči je v področju popolne turbulence sorazmerna tretji potenci kotne hitrosti

$$P = K d^5 \rho \omega^3 \quad (10)$$

Iz karakteristik porabe moči na slikah 2 in 3 je razvidno, da smo popolno turbulentno mešanje dosegli samo pri listastem, impelerskem in turbinskem mešalu v posodah z motilniki toka. Vrednosti konstante K in Reynoldsovega števila Re_K , pri katerem se začenja področje popolne turbulence, so zbrane v razpredelnici 2.

Med laminarnim in popolno turbulentnim področjem je razmeroma široko prehodno področje, v katerem je tok v posodi odvisen tako od viskoznosti kakor tudi od gostote tekočine. V prehodnem področju mešanja smo za popis izmerjenih karakteristik moči z regresijsko analizo dobili izraz

$$Ne = B \cdot Re^{(q_1 + q_2 \ln Re)} \quad (11)$$

Konstante B , q_1 in q_2 v enačbi (11) so izračunane iz rezultatov meritev in so prav tako zbrane v razpredelnici 2.

Pri listastem in turbinskem mešalu izravnava karakteristik porabe moči po enačbi (11) ni mogoča za obe spodnji veji, ki veljata za sisteme brez motilnikov toka.

Pri laminarnem mešanju je poraba moči neodvisna od motilnikov toka. Razlike pri porabljeni moči se pojavijo šele v prehodnem področju, kjer se karakteristike moči razcepijo v dve veji; zgornja velja za posode z motilniki toka, spodnja pa za posode brez njih. Pri posodah z motilniki toka pride

tu do povečane porabe moči zaradi preprečevanja nastajanja vrtničnega lijaka in spremembe geometrije sistema. Izjema pri tem je propelersko mešalo, pri katerem nismo opazili nikakršnega vpliva motilnikov toka na porabo moči v vsem izmerjenem področju Reynoldsovih števil.

4. PRENOS REZULTATOV POSKUSOV NA RAZLIČNO VELIKE NAPRAVE

Rezultate poskusov, ki so bili izvedeni na modelih, lahko seveda prenašamo na velike tehniške naprave, če je poleg geometrijske podobnosti zagotovljena tudi enakost vseh tistih brezdimenzijskih števil, ki v celoti popisujejo proces. Geometrijsko podobnost modela in tehniške izvedbe navadno dosežemo brez večjih težav, enakosti drugih vplivnih brezdimenzijskih števil pa pogosto ne moremo doseči. V teh primerih se moramo odločiti, katero od brezdimenzijskih števil je za opazovani proces najpomembnejše in samo tisto obdržimo konstantno, druga brezdimenzijska števila pa se potem na modelu in tehniški izvedbi med seboj razlikujejo.

Pri prenosu rezultatov na različno velike naprave se pri mešanju tekočin poleg pogoja o enakosti Reynoldsovih števil najpogosteje ravnamo po enem od naslednjih kriterijev: enaka vložena energija oziroma porabljena moč P na enoto volumna V mešane tekočine ali enaka obodna hitrost $\omega \frac{d}{2}$ zunanega roba mešala.

1. Enaka vložena energija na enoto volumna tekočine:

$$\frac{P}{V} = \text{idem} \quad (12)$$

Volumen tekočine je sorazmeren tretji potenci premera posode oziroma premera mešala:

$$V = a_1 d^3 \quad (13)$$

Razpredelnica 2: Vrednosti konstant v enačbah (7) do (11)

Mešalo	C	Re_C	B	q_1	q_2	Re_K	K
vijačno	8,17	300	30,0	-1,596	0,0647	10^5	—
gredasto	4,70	160	5,40	-1,310	0,0555	10^5	—
sidrasto — dolgo	7,40	100	28,0	-1,596	0,0666	10^5	—
sidrasto — kratko	3,11	110	7,60	-1,494	0,0641	10^5	—
listasto	3,28	40	1,57	-1,094	0,0715	$5 \cdot 10^{3*}$	$2,45 \cdot 10^{-2}$
impelersko	1,56	115	3,20	-1,586	0,0913	$6 \cdot 10^{3*}$	$3,30 \cdot 10^{-2}$
turbinsko	2,90	34	3,80	-1,404	0,0933	$8 \cdot 10^{3*}$	$2,20 \cdot 10^{-2}$
propelersko	1,59	40	3,80	-1,490	0,0685	10^5	—

* Samo za sisteme z motilniki toka.

zato lahko s pomočjo Newtonovega števila zapišemo:

$$\frac{P}{V} = a_2 Ne \omega^3 d^2 \varrho \quad (14)$$

Parametre, ki se nanašajo na model, bomo naprej označevali z indeksom »M«.

a) Laminarno področje mešanja, $Ne Re = C$

$$\frac{P}{V} = a_3 \frac{C}{Re} \omega^3 d^2 \varrho = a_3 C \eta \omega^2 = \text{idem} \quad (15)$$

Od tod izhaja razmerje kotnih hitrosti mešala

$$\frac{\omega}{\omega_M} = \left(\frac{\eta_M}{\eta} \right)^{1/2} \quad (16)$$

in razmerje Reynoldsovih števil

$$\frac{Re}{Re_M} = \left(\frac{d \eta_M}{d_M \eta} \right)^2 \frac{\omega_M \varrho}{\omega \varrho_M} \quad (17)$$

Pri enaki dovedeni moči na enoto volumna tekočine se v splošnem razlikujeta tako kotna hitrost mešala kakor tudi Reynoldsovo število na modelu in tehniški izvedbi naprave. Včasih lahko dosežemo enakost še enega od navedenih parametrov s pravilno izbiro tekočine, s katero opravljamo poskuse na modelu. Tako ostane v laminarnem področju pri enaki preskusni tekočini, $\eta = \eta_M$, konstantna tudi kotna hitrost mešala, Reynoldsovo število pa se spremeni.

b) Turbulentno področje mešanja, $Ne = K$

$$\frac{P}{V} = a_4 K \omega^3 d^2 \varrho \quad (18)$$

Od tod dobimo

$$\frac{\omega}{\omega_M} = \left(\frac{d_M}{d} \right)^{2/3} \left(\frac{\varrho_M}{\varrho} \right)^{1/3} \quad (19)$$

$$\frac{Re}{Re_M} = \left(\frac{\omega_M}{\omega} \right)^2 \frac{\eta_M}{\eta} \quad (20)$$

V turbulentnem področju se pri enaki preskusni tekočini in pri enaki dovedeni energiji na enoto volumna tekočine na modelu in tehniški izvedbi naprave spremenita tako Reynoldsovo število kakor tudi kotna hitrost mešala.

2. Enaka obodna hitrost zunanega roba mešala

$$\omega d = \text{idem} \quad (21)$$

oziroma

$$\frac{\omega}{\omega_M} = \frac{d_M}{d} \quad (22)$$

Razmerje Reynoldsovih števil

$$\frac{Re}{Re_M} = \frac{d \eta_M \varrho}{d_M \eta \varrho_M} \quad (23)$$

Razmerje specifične porabe moči

a) Laminarno področje

$$\left(\frac{P}{V} \right)_M = \frac{d_M \omega}{d \omega_M} \frac{\eta}{\eta_M} \quad (24)$$

b) Turbulentno področje

$$\left(\frac{P}{V} \right)_M = \frac{d}{d_M} \left(\frac{\omega}{\omega_M} \right)^2 \frac{\varrho}{\varrho_M} \quad (25)$$

5. SKLEP

Kljub razmeroma velikemu trudu, ki je bil vložen v raziskavo porabe moči pri mešanju tekočin v posodah z mešalom, za zdaj še ni uspelo rezultatov tako posplošiti, da bi bili veljavni za različne geometrije mešalnih sistemov in za različne tipe mešal. Celotno pri istem tipu mešal dobimo različne karakteristike porabe moči, če se pogoji vgradnje med seboj razlikujejo.

Pri projektiranju in snovanju novih tehnoloških procesov se moramo pogosto zatekati k modelnim poskusom, s katerimi poskušamo določiti tiste obratovalne pogoje, ki dajo želene procesne rezultate. Pri prenosu teh rezultatov na naprave proizvodnega obsega pa lahko obdržimo enake samo nekatere izbrane skupine parametrov, medtem ko druge kljub geometrijski podobnosti sistemov ne ostanejo konstantne.

LITERATURA

- [1] Ullrich, H.: Leistungsbeiwerte verschiedener Rührer. Aufbereitungs — Technik 12 (1971) 1, 7/18.
- [2] Zlokarnik, M.: Rührtechnik. Ullmanns Enzyklopädie der technischen Chemie, 2. del. Verlag Chemie, Weinheim, 1972.

Avtorjev naslov: dr. ing. Mirko Opara,
docent na Fakulteti za
strojništvo Univerze
v Ljubljani