

Ispitivanje osobina nenjutnovskog fluida napravljenog od skroba i vode

U radu su opisane neke fizičke osobine smeše skroba i vode. Ova smeša je jedan od tipova nenjutnovskih fluida koji nemaju stalnu viskoznost. Kada se sloj ove smeše postavi na neki oscilator (u ovom slučaju zvučnik) javljaju se različiti oblici (Faradejevi talasi, metastabilne i stabilne rupe i delokalizovana stanja). Koji će se od navedenih oblika dobiti zavisi od gustine fluida ali i frekvencije i amplitude oscilovanja. Ispitivano je pri kojim uslovima se dobijaju koji oblici. U drugom delu rada ispitivane su osobine toka niz strmu ravan. Određeno je pri kojim uslovima dolazi do prelaza iz laminarnog u turbulentni tok.

Uvod

Smeša skroba i vode pokazuje čudne osobine u različitim uslovima. Mnogima je poznato da se pri mešanju gustina sa vodom javlja otpor jer smeša pod pritiskom prividno postaje suva i čvrsta, čak se i lako mrvli. Međutim, čim se oslobodi pritiska vraća se u tečno stanje. Ovo je primer dilatantnog nenjutnovskog fluida koji je karakterističan po tome što mu se koeficijent viskoznosti povećava sa povećanjem brzine toka. Ovakvih i sličnih fluida ima još u prirodi i oni pod određenim uslovima često pokazuju interesantne osobine. Tako je npr. primećeno da tanak sloj fluida koji je postavljen na oscilator (npr. zvučnik) pri određenim frekvencijama i amplitudama prerasta u prstolike izraštaje koji se ponašaju haotično. Kasnijim istraživanjima, dodavanjem nekih primesa, dobijene su stabilne rupe u sličnom fluidu. Naravno, pored ovih oblika na mnogim frekvencijama i ampli-

tudama javljaju se i Faradejevi talasi, karakteristični za sve fluide koji su izloženi vibracijama (Merkt *et al.* 2004).

Takođe, čudan je prelaz iz laminarnog u turbulentan tok ovog fluida. Naime, do prelaza dolazi pri dosta manjim brzinama nego kod njutnovskih fluida. Najverovatnije se ovo dešava zbog same prirode fluida da naglo povećava svoju viskoznost kako mu raste brzina toka (Balmforth *et al.* 2005). Uopšte, pri laminarnom toku viskoznost sprečava sve eventualne poremećaje jer se ovakav tok javlja uglavnom pri malim brzinama. Međutim, kad brzina toka postane veća viskoznost ne može da spreči poremećaje u toku i tada nastaje turbulentan tok. Naučnike je godinama zbunjivao turbulentan tok jer nikad nisu uspevali da predvide kada će do njega doći. Svi su svoje eksperimente bazirali na toku vode kroz cev i svi rezultati su se razlikovali. Prvi koji je uspeo da nađe vezu između ključnih parametra toka (brzine, gustine tečnosti, viskoznosti i dimenzija cevi) bio je irski fizičar Ozborn Rejnolds koji je otkrio da do prelaza iz laminarnog u turbulentan tok dolazi uvek na istim vrednostima kombinacije ključnih parametara:

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta} \quad (1)$$

gde je ρ gustina fluida, v brzina toka, d prečnik cevi, a η koeficijent viskoznosti. Ova veličina je bezdimenzionalna i nazvana je Rejnoldsov broj. (Re). Pokazalo se da se ista kombinacija parametara može primeniti bilo gde u toku fluida, samo što je potrebno dobro odrediti geometrijsku konstantu (za cev je to prečnik, a npr. za strmu ravan će biti

Vladimir Petrović (1991), Požega, Miloša Obilića 12, učenik 2. razreda Gimnazije „Sveti Sava“ u Požegi

MENTORI:
Danjan Pelc, student fizike Univerziteta u Zagrebu

Marin Lukas, student mašinstva Univerziteta u Zagrebu

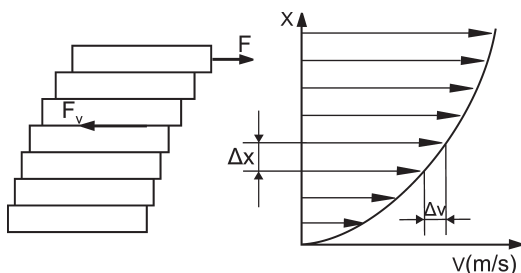
debljina sloja). U mehanici fluida je i danas mnogo nerešenih problema oko nastanka turbulencije pa je zato Reynoldsov broj neizbežan u eksperimentalnoj dinamici fluida (Joos 1986; D. Pelc, usmene informacije)

Da bismo objasnili nenjutnovske fluide potrebno ih je odvojiti po nečemu od njutnovskih fluida u koje spadaju svi gasovi i neke tečnosti (voda, glicerol i sl.). Za to ćemo iskoristiti Njutnov zakon viskoznosti koji kaže da se pri toku fluida javljaju slojevi i da između njih deluju tangencijalne sile viskoznosti. Brzine između slojeva nisu jednake već linearno opadaju kako se približavamo graničnom sloju (slika 1). Tangencijalna sila viskoznosti je srazmerna brzini i površini sloja a obrnuto srazmerna debljini sloja:

$$F_v = \eta S \frac{\Delta v}{\Delta x}$$

Koeficijent proporcionalnosti η je ustvari koeficijent viskoznosti i njegova vrednost zavisi od prirode fluida (Čaluković 2007).

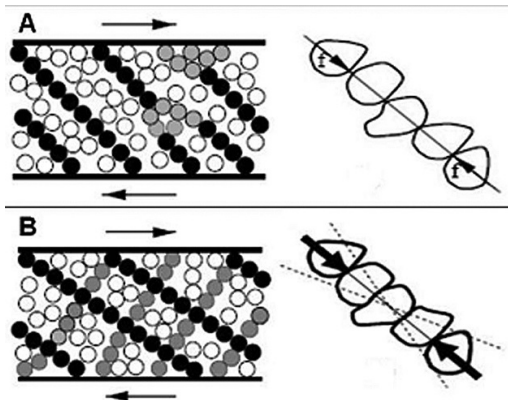
Za razliku od njutnovskih fluida, nenjutnovski se ne ponašaju prema Njutnovom zakonu viskoznosti, pa veza između sile viskoznosti i gradijenta brzine nije linearna.



Slika 1. Pomeranje slojeva fluida

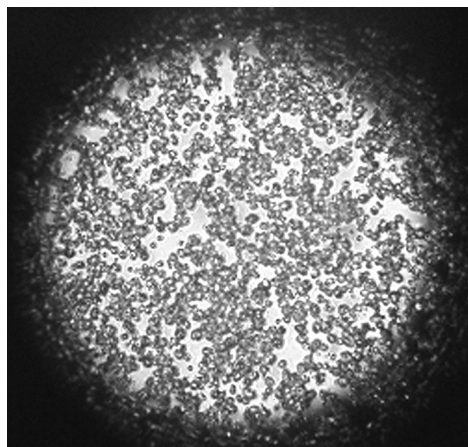
Figure 1. Moving of fluid layers

Postoje tri osnovne kategorije nenjutnovskih fluida: vremenski nezavisni (kod kojih koeficijent viskoznosti ne zavisi od vremena), vremenski zavisi (kod kojih koeficijent viskoznosti zavisi od vremena) i viskoelastični (koji pod dejstvom sile zauzimaju oblik sličan elastičnim čvrstim telima). Vre-



Slika 2. Prostorni raspored micela i stvaranje niza

Figure 2. Space configuration of micelles and making of a force chain



Slika 3. Micele pod mikroskopom

Figure 3. Micelles of cornstarch under microscope

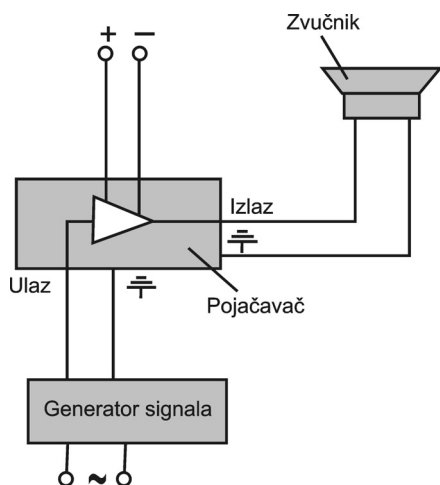
menski nezavisni se dalje dele na dilatantne, pseudoplastične i viskoplastične. Smeša skroba i vode spada u dilatantne nenjutnovske fluide kod kojih se sa povećanjem brzine toka koeficijent viskoznosti povećava (Chabra & Richardson 1999). Konkretno kod ove smeše razlog zbog kog dolazi do povećanja viskoznosti je prostorni raspored micela skroba. Naime, dok nema nikakve sile koja deluje na fluid

(ili ako fluid ne teče) miclele su raspoređene slobodno, jedna drugu ne dodiruju u pravilnom rasporedu i tako zajedno sa vodom čine tečnu smešu (slika 2A). Međutim ako fluid teče ili se na njega deluje nekom silom, miclele se raspoređuju tako da formiraju izukrštane nizove koji daju smeši čvrstinu (slika 2B). Što je više skroba u vodi to je ova pojava izraženija pa je zato viskoznost kod gušće smeše veća nego kod ređe (Cates *et al.* 1998).

Ekperimenti

Ispitivanje oblika dobijenih oscilovanjem zvučnika

Ispitivano je pri kojim frekvencijama i amplitudama oscilovanja zvučnika i pri kojim masenim udelima skroba u smeši nastaju neki od oblika karakteristični za fluid koji je izložen vibracijama. Aparatura za ove eksperimente sastojala se od zvučnika, generatora frekvencije, audio pojačavača od 80W i napajanja za pojačavač (slika 4). Na zvučnik je postavljena kružna posuda prečnika 9cm u koju je sipan fluid. Debljina sloja je uvek bila 5.0 ± 0.5 mm. Ispitivane su smeše skroba i vode različitih masenih udela skroba (54%, 56%, 57%, 58% i 59%, tj. približno 24, 26, 27, 28 i 29 g skroba na 20 mL vode). Skrob koji je korišćen u sebi je sadržao oko 14% vode.



Slika 4. Šema aparature za prvi deo eksperimenta

Figure 4. Schem of aparature for the first experiments

Na različitim frekvencijama i amplitudama na jednoj gustini mogla su se uočiti 4 različita stanja:

- Faradejevi talasi različitih oblika, karakteristični za sve tečnosti kada se nađu pod uticajem vibracija,
- metastabilne rupe koje su se stvarale uduvanjem vazduha u fluid i zadržavale se duže od 30 sekundi i kraće od 5 minuta,
- stabilne rupe koje su nastajale na isti način kao i metastabilne ali su se zadržavale u fluidu više od 5 minuta i
- delokalizovana stanja koja su se javljala u vidu prstolikih izraštaja u fluidu i tada je smeša počinjala da se ponaša potpuno haotično.

Frekvencije na kojima su se dobijali neki od oblika kretale su se od 60Hz do 150Hz za različite gustine a generator frekvencije je sa tačnošću od oko 5Hz. Amplituda je menjana promenom napona. Merena je tako što je na posudi sa fluidom nacrtana crna linija koja je fotografisana sa ekspozicijom od 15 sekundi dok je zvučnik oscilovao. Iza linije postavljen je milimetarski papir pa se sa fotografije mogla očitati amplituda. Izmerene amplitude su se kretale od 0.3 do 1 mm sa tačnošću od 10 do 15%.

Određivanje kritične vrednosti Reynoldsovog broja turbulentnog toka niz strmu ravan

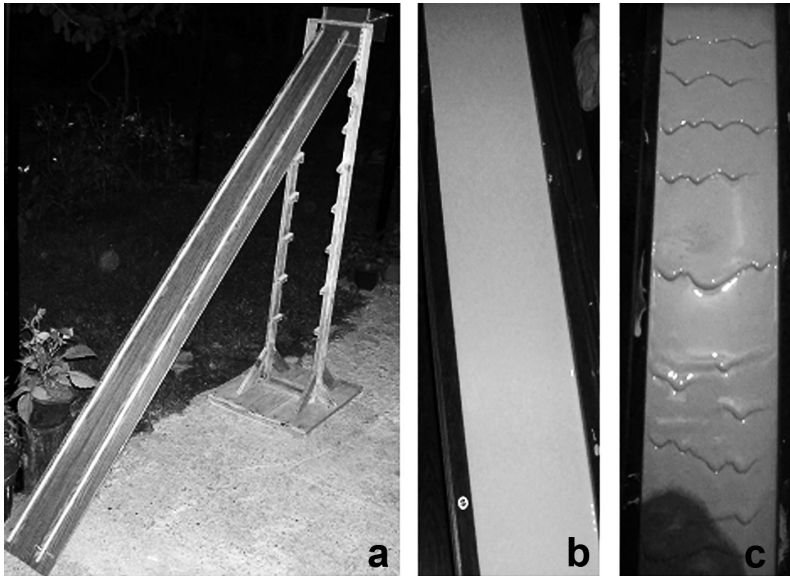
Ispitivan je tok fluida niz strmu ravan i određen Reynoldsov broj kod kog laminaran prelazi u turbulentan tok za više smeša različitih masenih udela skroba.

Kako je smeša vrlo viskozna brzina toka je konstantna iako postoji nagib ravni, pa je merenje brzine bilo vrlo jednostavno.

U eksperimentima je korišćena strma ravan dužine 2 m napravljena tako da se nagib može menjati od 10° do 45° , a širina od 9 do 18 cm. Na vrhu se nalazio rezervoar iz kog je ispuštana tečnost i nivo tečnosti je održavan konstantnim.

Kako se koeficijent viskoznosti menja sa promenom brzine toka, bilo ga je potrebno izmeriti za brzine pri kojima laminaran prelazi u turbulentan tok. Za ovo je korišćen Stoksov zakon kretanja kuglice kroz fluid kod koga je sila viskoznosti proporcionalna brzini kuglice i njenom poluprečniku:

$$F_v = 6\pi\eta r v$$



Slika 5.
Strma ravan, laminaran i turbulentan tok

Figure 5.
Inclined plane, laminar and turbulent flow

η je koeficijent viskoznosti, r – poluprečnik kuglice, a v – brzina kuglice. Kroz fluid su puštane da padaju različite kuglice dok se nije dobila brzina jednaka onoj kod koje se javljao turbulentan tok. I u ovom slučaju brzina je ravnomerna jer je viskoznost jako velika. Ovo je urađeno za sve gustine koje su ispitivane. Kako na kuglicu deluje i sila potiska potrebno je uračunati i njeno delovanje:

$$mg = F_{\text{pot}} + F_v$$

(m je masa kuglice, a g – gravitaciono ubrzanje).

Iz ove dve jednačine lako se izvodi izraz za koeficijent viskoznosti:

$$\eta = \frac{2(\rho - \rho_0)r^2g}{9v}$$

gde je ρ gustina kuglice, ρ_0 – gustina fluida, r – poluprečnik kuglice, g – gravitaciono ubrzanje Zemlje a v – brzina kuglice (Čaluković 2007).

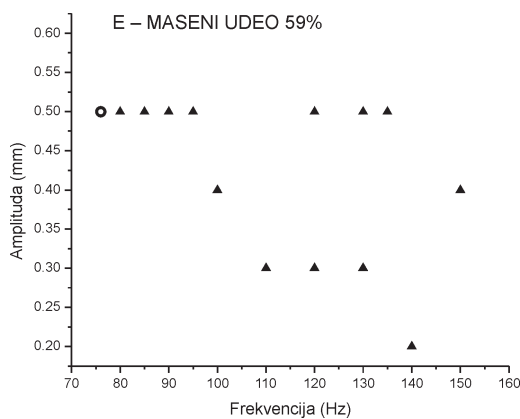
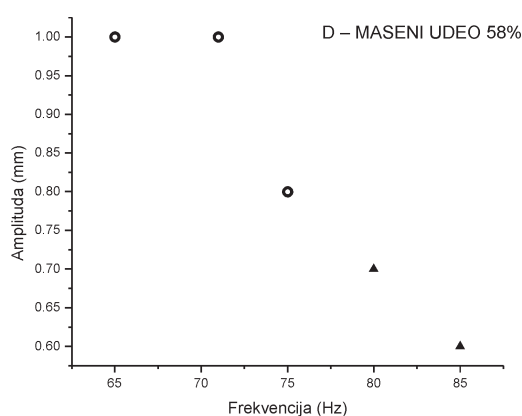
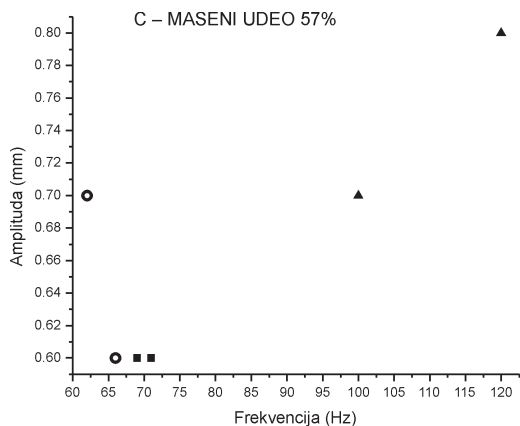
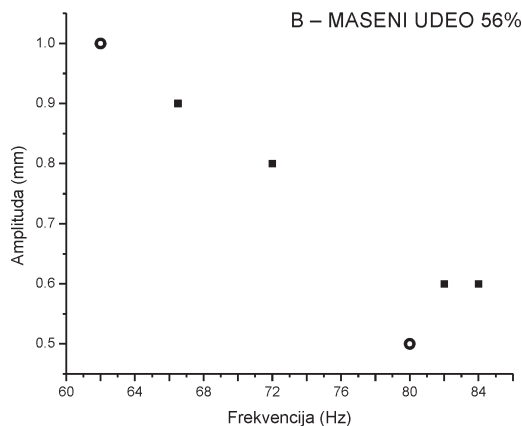
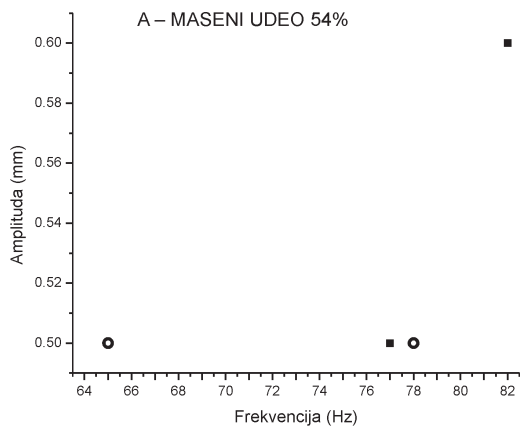
Rezultati

1. Za masene udele 54%, 56%, 57%, 58% i 59% za različite frekvencije i amplitude, dobijeni su različiti oblici (slika 7). Na graficima je prikazano pri kojim uslovima se dobijaju metastabilne rupe, stabilne rupe i delokalizovana stanja. Dobijeni grafici su dati na slici 6.

2. U ovom delu je određena zavisnost kritične vrednosti Rejnoldsovog broja turbulentnog toka od masenog udela skroba u vodi. Prvo su određene brzine na kojima dolazi do turbulentnog toka za različite masene udele. Izmerena je zapremina i masa jednog dela smeše i odatle se lako mogla odrediti gustina. U tabeli 1 su date viskoznosti za različite masene udele pri brzini koja odgovara brzini turbulentnog toka. Greška za koeficijent viskoznosti je između 5% i 10%.

Tabela 1. Koeficijenti viskoznosti za različite masene udele

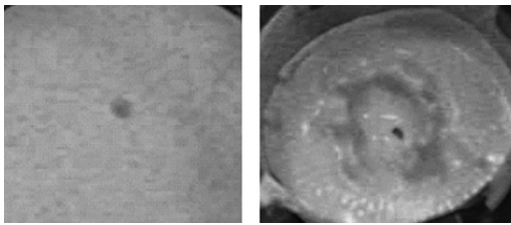
Maseni udeo (%)	η (Pa · s)	Maseni udeo (%)	η (Pa · s)
55	2.7	56.5	4.4
55.5	3.1	57.5	7
56	3.7	58.5	11.7



- ▲ 1 – delokalizovano stanje
- 2 – metastabilna rupa
- 3 – stabilna rupa

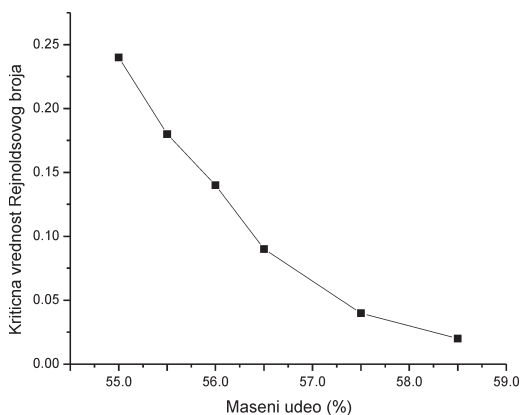
Slika 6. Rezultati koji su dobijeni u eksperimentima sa zvučnikom; krugovi su metastabilne rupe, crni kvadrati stabilne rupe, a trouglovi delokalizovana stanja.

Figure 6. Results from the experiments with loudspeaker; circles are metastable holes, black squares are stable holes and triangles are delocalized states.
Legend: 1 – delocalized state, 2 – metastable hole, 3 – stable hole



Slika 7. Rupa i delokalizovano stanje

Figure 7. Hole and delocalized state



Slika 8. Grafik zavisnosti kritične vrednosti Reynoldsovog broja od masenog udela skroba u smeši

Figure 8. Dependence of Reynolds number critical value from mass percentage of cornstarch in mixture

Zavisnost kritične vrednosti Re broja turbulentnog toka od masenog udela skroba u vodi data je na grafiku na slici 87.

Diskusija

Tokom izvođenja eksperimenata zaključeno je da vrlo veliki uticaj na ponašanje fluida ima način mešanja skroba sa vodom, tj. homogenost smeše. Naime, bilo je vrlo važno dobro promešati da bi smeša bila skoro homogena jer su se u suprotnom dobijali veoma loši rezultati. Zbog toga nije bilo moguće ispitivati smeše sa većim masenim udelom

skroba jer je mešanje bilo izuzetno teško i dobijana je vrlo heterogena smeša. Takođe, prilikom izvođenja eksperimenata sa zvučnikom primećeno je da ako fluid stoji neko vreme skrob se taloži na dnu i tako se dobija nehomogena smeša. Ovo taloženje se može sprečiti dodavanjem određenih primesa, npr. cezijum-hlorid, međutim njega nije bilo moguće nabaviti. Zbog toga su smeše koje su ispitivane pravljene više puta da bi se izbeglo stvaranje nehomogene smeše.

Prilikom izvođenja eksperimenata sa zvučnikom na određenim frekvencijama došlo je do pojave rezonancije, pa se posuda u kojoj se nalazio fluid uvijala i u znatnoj meri remetila eksperiment. Da bi se to izbeglo, tj. da bi se promenila frekvencija na kojoj dolazi do rezonancije, naspramne ivice posude su učvršćene šipkom i rezonancija se javljala na znatno višim frekvencijama od onih koje su korišćene.

Kod nekih delokalizovanih stanja, turbulencija je bila toliko izražena da su čak iz fluida počele da se odvajaju od izraštaja, a zatim i da iskaču „kapljice“.

Zaključak

Celokupna aparatura nije dozvolila da se dobije dovoljno rezultata da bi se mogao nacrtati fazni dijagram što je bilo u planu. Iz rezultata koji su dobijeni u prvom delu rada zaključeno je da je za sve oblike potrebna određena viskoznost fluida da bi se oni javili. Tako na primer, da bi se rupa zadržala u fluidu potrebna je dobra kombinacija vrednosti masenog udela, amplitude i frekvencije. Ovim se postiže određena viskoznost koja rupu daje stabilnost i ona se ne zatvara. Najbolja smeša za dobijanje stabilnih rupa je bila smeša sa masenim udelom 56%. Međutim kod smeša sa većim masenim udelom i viskoznost se povećava pa stabilnost prerasta u haotično stanje što se manifestuje pojavom prstolikih izraštaja. Tako se na primer na smeši masenog udela 59% primećuje vrlo česta pojava delokalizacije. Suprotno ovome, smeše sa malim masenim udelima skroba nemaju dovoljno veliku viskoznost da bi se dobila rupa ili delokalizovano stanje.

Ono što je zanimljivo kod dobijenih rezultata za Reynoldsov broj jeste njegova veoma mala vrednost (reda veličine 0.1 i 0.01). Radi poređenja kritična vrednost Reynoldsovog broja za tok vode kroz cev iznosi oko 2000 (D. Pelc, usmena informacija). Ovo pokazuje da pri toku vrlo lako dolazi do turbulencije. Takođe, sa povećanjem masenog udela

kritična vrednost Rejnoldsovog broja opada. To pokazuje da je, što je veći maseni udeo, nestabilnost toka veća.

Zaključujemo da, u oba slučaja koja su ispitivana u ovom radu, sa povećanjem gustine ispitivanog fluida njegova nestabilnost raste i da vrlo male promene u gustini mogu dovesti do promena u ponašanje fluida.

Zahvalnost. Zahvaljujem se svojim mentorima, Damjanu Pelcu, studentu fizike Univerziteta u Zagrebu, i Marinu Lukasu, studentu mašinstva Univerziteta u Zagrebu, na strpljenju i pruženoj pomoći, kao i Predragu Popoviću, učeniku 3. razreda Pete beogradske gimnazije, i sestri Mariji Petrović na pomoći tokom realizacije eksperimenata i ocu Luki Petroviću na pomoći u pravljenju strme ravni.

Literatura

Merkt F. S., Deegan R. D., Goldman D. L., Rericha E. C., Swinez H. L. 2004. Persistent holes in a fluid. *Physical Review Letters*, **92** (18)

Balmforth N. J., Bush J. W. M. and Craster R. V. 2005. Roll waves on flowing cornstarch suspensions. *Physics Letters A*, **338** (6)

Joos G. 1986. *Theoretical Physics*. New York: Dover

Čaluković N. 2007. *Fizika za drugi razred Matematičke gimnazije*. Beograd: Krug

Chabra R. P., Richardson J.F. 1999. *Non-Newtonian Flow in the Process Industries*. Oxford: Butterworth-Heinemann

Cates M. E., Wittmer J. P., Bouchaud J. P., Claudin P. 1998. Jamming, Force Chains and Fragile Matter. *Physical Review Letters*, **81** (9)

Vladimir Petrović

Examination of Properties of Non-Newtonian Fluid Made of Cornstarch and Water

In this work some physical properties of a mixture of cornstarch and water were investigated. This mixture is one of the types of non-Newtonian fluid without a fixed viscosity.

When we put a layer of this mixture on an oscillator (in this case loudspeaker) we can see different shapes (Faraday waves, metastable and stable holes and delocalized states). The shapes depend on fluid density and frequency and amplitude of oscillation. It was analysed under which conditions these shapes occur.

In the second part of the work the properties of flow down a constant incline were explored. Different measurements were made to see when the flow transforms from laminar to turbulent.

