
Nina Jakovljević i Stefan Bukorović

Ispitivanje Vajsenbergovog efekta u njutnovskim fluidima

Vajsenbergov efekat nastaje pri rotaciji uskog vertikalnog štapa u posudi sa dve njutnovske tečnosti koje se međusobno ne mešaju. U takvom toku fluida se javlja niz nestabilnosti koje dovode do podizanja površinskog sloja donje tečnosti uz štap. U ovom radu su ispitivani oblik i visina podignutog stuba tečnosti, a varirani su prečnik i ugaona brzina štapa. Razlika prečnika posude i prečnika štapa bila je u opsegu od 18 mm do 63 mm, a maksimalna brzina štapa iznosila je 2500 obrtaja u minuti. Korišćene tečnosti su destilovana voda u kombinaciji sa različitim vrstama ulja. Pokazuje se da prečnik štapa značajno utiče na pojavu efekta: ugaona brzina na kojoj se efekat javlja je veća za manji prečnik. Kada je razlika prečnika posude i štapa manja od 43 mm, tj. 65% prečnika posude, tečnosti se mešaju na malim brzinama i efekat nije uočljiv. Rezultati potvrđuju da visina stuba tečnosti linearno zavisi od ugaone brzine rotacije štapa; Zapaženo je da ovo važi ispod kritične ugaone brzine, na kojoj stub tečnosti naglo menja oblik i prečnik. Brzina na kojoj se efekat javlja zavisi od vrste gornje tečnosti.

Uvod

Za vreme Drugog svetskog rata, prilikom pravljenja goriva za bacače plamena, često se dešavalo da se određene smeše u procesu mešanja penju uz osovine miksera, a ponekad i izlaze van zidova suda. Ovo je stvaralo poteškoće tokom proizvodnje, pa je britanska vlada, u periodu od 1942. do 1947. godine, finansirala istraživanja

koja su imala za cilj da ispitaju uzrok te pojave. Ispitivano je ponašanje mnogih materijala u različitim uslovima, time su nastala brojna otvorena pitanja u vezi posmatranih pojava. Nakon završetka rata, objavljeno je više radova u kojima je, između ostalog, tumačen i prethodno pomenut fenomen (Lander 1945, Garner *et al.* 1950; prema Tanner i Walters 1998). Najveći doprinos je dao austrijski naučnik Karl Vajsenberg (Karl Weissenberg), po kome efekat nosi naziv Vajsenbergov efekat (engl. Weissenberg effect ili još i rod-climbing effect). On je povezao neobično ponašanje određenih materijala, tj. fluida sa postojanjem normalnog napona koji nastaje istezanjem dugačkih molekulskih struktura. Pomenuti napon dovodi do opiranja fluida centrifugalnoj i gravitacionoj sili, povlačeći se uz i ka rotirajućem cilindru (Tanner i Walters 1998; Weissenberg 1947). Nakon Vajsenberga, efekat se primenjuje u raznim industrijskim oblastima, a čak i danas nalazi nove primene u oblastima poput elektronike. Naime, na osnovu Vajsenbergovog efekta, na mikroskopskoj skali se može dizajnirati efikasan uređaj za direktno pisanje (engl. direct-writing). Rotacija osovine bi omogućila neprekidni dotok materijala, čime bi se mogli rešiti problemi velikog otpora tečnosti pri transportu kroz uske cevi, blokade u mlaznicama itd. Smatra se da će efekat u budućnosti imati potencijalnu primenu u mikroelektromehaničkim sistemima, fleksibilnoj elektronici i bio-uređajima (Mei *et al.* 2017).

Nina Jakovljević (2001), Kruševac, Tekija bb,
učenica 2. razreda Gimnazije u Kruševcu

Stefan Bukorović (2002), Šabac, Janka
Veselinovića 67, učenik 2. razreda Gimnazije u
Šapcu

MENTORI:

Marija Milutinović, student Elektrotehničkog
fakulteta Univerziteta u Beogradu

Petar Bojović, Ludvig Maksimiljan Univerzitet
u Minhenu

Marija Šindik, student Fizičkog fakulteta
Univerziteta u Beogradu

Vajsenberg u svom radu govori i o drugačijem efektu, tj. spuštanju nivoa tečnosti uz osovinu mešalice, ističući da su različite pojave posledica vrste fluida. Ukoliko je vertikalni rotirajući cilindar delimično potopljen u posudu sa nenjutnovskim fluidom, površinski sloj tog fluida tj. meniskus se penje uz cilindar. U drugom slučaju, kada je u posudi njutnovski fluid, meniskus će se prilikom rotacije cilindra povući ka ivicama posude pod dejstvom centrifugalne sile (Weissenberg 1947).

Razlika između nenjutnovskih fluida (npr. kukuruzni sirup, smeša skroba i vode, med) i njutnovskih (voda, alkohol, određena ulja i glicerol) objašnjava se Njutnovim zakonom viskoznosti, koji kaže da se pri proticanju fluida javljaju slojevi između kojih deluju tangencijalne sile. Kako se približavamo graničnom sloju, brzine između slojeva linearno opadaju, odnosno nisu međusobno jednake. Kod njutnovskih fluida tangencijalna sila viskoznosti je srazmerna brzini i površini sloja, a obrnuto srazmerna debljini sloja, i zavisi od prirode fluida koja će odrediti koeficijent navedene proporcionalnosti. Nenjutnovski fluidi pokazuju nelinearnu zavisnost između sile viskoznosti i gradijenta brzine, tj. ne povećavaju se ovom zakonu (Petrović 2008).

Kod njutnovskih fluida, pored pojave da se meniskus tečnosti spušta niz rotirajući cilindar, primećena je i pojava uzdizanja tečnosti, ali samo u posebnom slučaju. Podizanje meniskusa njutnovskog fluida, nalik Vajsenbergovom efektu kod nenjutnovskih fluida, nastaje kada se u sudu, u kojem rotira uzak vertikalni cilindar, nadu dve njutnovske tečnosti koje se ne mešaju. Jedan od uslova za pojavu efekta je da donja (gušća) tečnost bude manje viskozna od gornje.

Određenim merenjima utvrđeno je da ne postoji značajan i merljiv uticaj normalnog napona pri nastajanju Vajsenbergovog efekta u njutnovskim fluidima, već se on može objasniti kao posledica pojave nestabilnosti u Tejlör-Kuetovom toku (eng. Taylor-Couette flow; Bonn *et al.* 2004.). U pitanju je tok fluida između dva koncentrična cilindra, od kojih jedan ili oba rotiraju, i čije ponašanje se menja u zavisnosti od toga koji od cilindara rotira i kojom brzinom.

Kada spoljašnji cilindar tj. posuda miruje, a ugaona brzina unutrašnjeg cilindra ima malu vrednost, tok oba fluida je stabilan i laminaran. Povećanjem ugaone brzine cilindra preko odre-

đenog praga, tok donjeg fluida postaje nestabilan, i javlja se sledeće stacionarno stanje koje se naziva Tejlörov vrtlog (eng. Taylor vortex; Bonn *et al.* 2004; Russell 1991; Dou *et al.* 2008).

Nestabilnost se javlja u manje viskoznoj, donjoj tečnosti, na određenoj vrednosti Tejlörrova broja, koji predstavlja bezdimenzionalnu veličinu dobijenu kombinacijom različitih parametara. Efekat će se javiti na određenoj ugaonoj brzini, na kojoj je prethodno već došlo do nestabilnosti. Razlog zbog kojeg se kritična brzina na kojoj se efekat javlja i početak nestabilnosti neće poklopiti jeste kapilarni pritisak, koji teži da sloj između tečnosti održi ravnim. Ranija pojava efekta je sprečena time što je za savladavanje kapilarnog pritiska potrebna veća ugaona brzina od one na kojoj dolazi do nestabilnosti; vrednost ove brzine zavisi od gustine fluida (Bonn *et al.* 2004).

Ukoliko je kapilarni pritisak zanemarljiv, moguće je izvesti formulu koja određuje visinu h do koje se meniskus donjeg fluida popeo:

$$h \approx \frac{100 \rho \eta^2}{2 \varepsilon g d^2 \rho^2 \Delta \rho}$$

gde je $\Delta \rho$ je razlika u gustinama dva njutnovska fluida, g je gravitaciono ubrzanje, d je razlika prečnika spoljašnjeg i unutrašnjeg cilindra, ρ je gistica donjeg fluida i η koeficijent viskoznosti donjeg fluida u kome dolazi do nestabilnosti; ε opisuje na kojoj se kombinaciji ugaonih brzina cilindra javlja Tejlörov vrtložni tok i formula za njegovo izračunavanje je:

$$\varepsilon = \frac{\Omega - \Omega_{TC}}{\Omega_{TC}}$$

gde je Ω je ugaona brzina unutrašnjeg cilindra, Ω_{TC} kritična vrednost ugaone brzine na kojoj se javlja nestabilnost u toku (Bonn *et al.* 2004).

Vajsenbergov efekat u njutnovskim fluidima je pronašao primenu u procesima dobijanja emulzija, tj. smeša dve tečnosti koje se međusobno ne mešaju, pri čemu je jedna od njih raspoređena u obliku kapi u drugoj. Takođe, rotiranjem štapa u posudi u kojoj se nalazi emulzija moguće je grupisati kapi uz sam štap, što se može iskoristiti kada je potrebno razdvajiti dve tečnosti, npr. pri prečišćavanju vode (Fujimoto i Takeda 2009).

Cilj ovog rada je ispitivanje Vajsenbergovog efekta u različitim parovima njutnovskih tečnosti i to u vodi u pojedinačnoj kombinaciji sa sili-

konskim, suncokretovim, maslinovim i parafinskim uljem. Posmatrana je vrednost ugaone brzine na kojoj se efekat javlja u zavisnosti od prečnika rotirajućeg cilindra. Ispitivano je u kojim je granicama moguće posmatrati efekat, tj. šta se dešava sa visinom i oblikom podignutog stuba tečnosti na većem opsegu ugaone brzine.

Aparatura i metod

U posudi cilindričnog oblika, kojoj odgovara laboratorijska čaša zapremine 250 mL, prečnika 68 mm, nalaze se dve njutnovske tečnosti koje se međusobno ne mešaju. Odnos njihovih zapremina je 1 : 1. Prva, donja tečnost je u svakoj postavci destilovana voda koja je obojena kako bi se jasno uočila razlika između slojeva dve tečnosti. Viskoznost vode je 1 mPa·s, a njena gustina je 1000 kg/m³. Druga, gornja tečnost je silikonsko, suncokretovo, parafinsko ili maslinovo ulje. U laboratorijsku čašu se sipa 125 mL obojene vode, a potom 125 mL odgovarajućeg ulja.

Kao vertikalni rotirajući uski cilindar, korišćena je korišćena je laboratorijska stubna mehanička mešalica u čiju se steznu glavu ubacuje štap. Mešalica ima kontinualno podesivu brzinu sa maksimalnim brojem obrataja od 2500 RPM i displej koji prikazuje trenutan broj obrataja. Greška displeja iznosi $\pm 0.1\%$ od prikazane vrednosti. U steznu glavu mešalice se mogu ubaciti cilindri prečnika do 13 mm. Svaki štap je dužine 25 mm, pri čemu je 15 mm dužine namenjeno da stane u mešalicu i prečnika je 8 mm, a preostalih

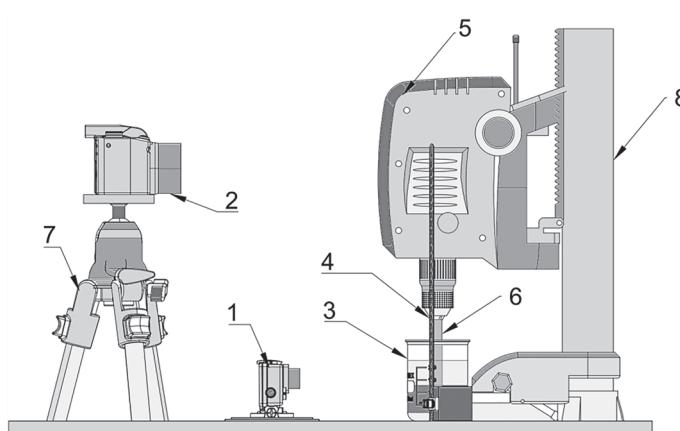
10 mm je prečnika 4, 5, 8, 10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 i 50 milimetara. Cilindri su napravljeni od nerđajućeg čelika.

Mešalica je pričvršćena za stativ, a njeni pomjeranje je sprečeno pomoću trakaste kleme. Nakon postavljanja štapa unutar mešalice, isti se potapa u posudu sa odgovarajućim tečnostima (slika 2).

Jedna kamera snima podizanje nivoa tečnosti. Postavljena je u ravni sa granicom između dve tečnosti, efekat se snima pod ugлом od devedeset stepeni. Druga kamera snima displej sa brojem obrtaja (slika 1).

Obrada snimaka

Dobijeni snimci su obrađeni u Matlabu. U prvom delu programa se obrađuje snimak sa prve kamere (slika 2). Sa crno-belog snimka je izdvajena samo gornja tečnost u blizini cilindra. Kako se donja tečnost penjala uz cilindar, pojavljujivali su se tamni pikseli, pa je visina vodenog stuba bila jednak broju tamnih piksela. Pikseli su prevedeni u milimetre, na osnovu odnosa broja piksela i dužine dobijenog pomoću lenjira postavljenog pored suda. Drugi deo programa prepoznaje cifre sa digitalnog sedmo-segmentnog displeja. Kamere su sinhronizovane, pa se simultano sa očitavanjem visine tečnosti beleži broj obrtaja mešalice. Pri merenju se mešalica bar pet sekundi nalazi na jednom broju obrtaja, a visina se meri sa frejmova neposredno pre promene ugaone brzine. Greška visine je dobijena na osnovu dvadeset uzastopnih frejmova.



Slika 1. Šema aparuture:
 1 – prva kamera, 2 – druga kamera,
 3 – laboratorijska čaša sa
 tečnostima, 4 – ruler,
 5 – laboratorijska stubna mešalica
 sa očitavanjem broja obrtaja na
 displeju, 6 – rotirajući uski cilindar,
 7 – stativ za kameru, 8 – stativ za
 mešalicu.

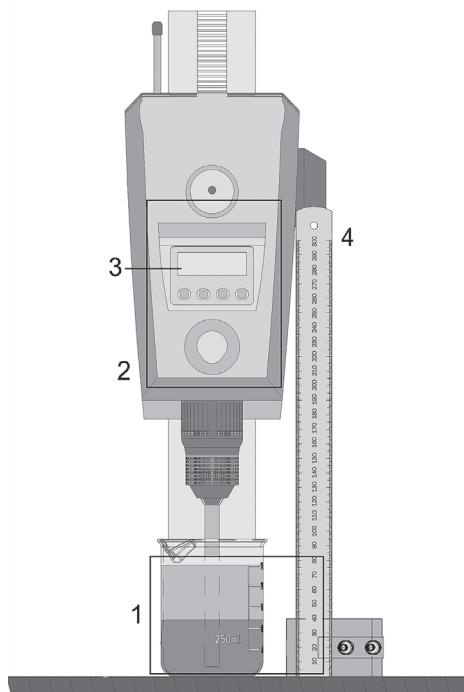
Figure 1. Instrumental setup:
 1 – lower camera , 2 – upper
 camera , 3 – beaker with two
 immiscible fluids, 4 – ruler,
 5 – laboratory overhead stirrer with
 digital speed display, 6 – rotating
 rod, 7 – tripod stand for camera,
 8 – overhead stirrer stand.

Tabela 1. Prikaz karakteristika tečnosti korišćenih u eksperimentu*

Ulje	Dinamička viskoznost (mPa · s)	Temperatura (°C)	Gustina (kg/m ³)	Kinematička viskoznost (m ² /s)
Parafinsko ulje	64	24.5	794 ± 13	$(8.059 \pm 0.017) \cdot 10^{-5}$
Silikonsko ulje 1**	291	25	970	0.0003
Silikonsko ulje 2	382	24.6	891 ± 14	0.000 ± 0.016
Maslinovo ulje	71.3	24.7	845 ± 8	$(8.438 \pm 0.009) \cdot 10^{-5}$
Suncokretovo ulje	—	—	930 ± 30	—

* Vrednosti za silikonsko ulje 1 dobijene su od proizvođača (za suncokretovo nisu izmerene)

** Korišćeno u svim merenjima



Slika 2. Šema aparature sa obeleženim vidnim poljima za obe kamere:

1 – pravougaonik predstavlja vidno polje prve kamere, 2 – pravougaonik predstavlja vidno polje druge kamere, 3 – displej koji prikazuje broj obrtaja rotirajućeg cilindra u minutu, 4 – lenjir.

Figure 2. Instrumental setup:

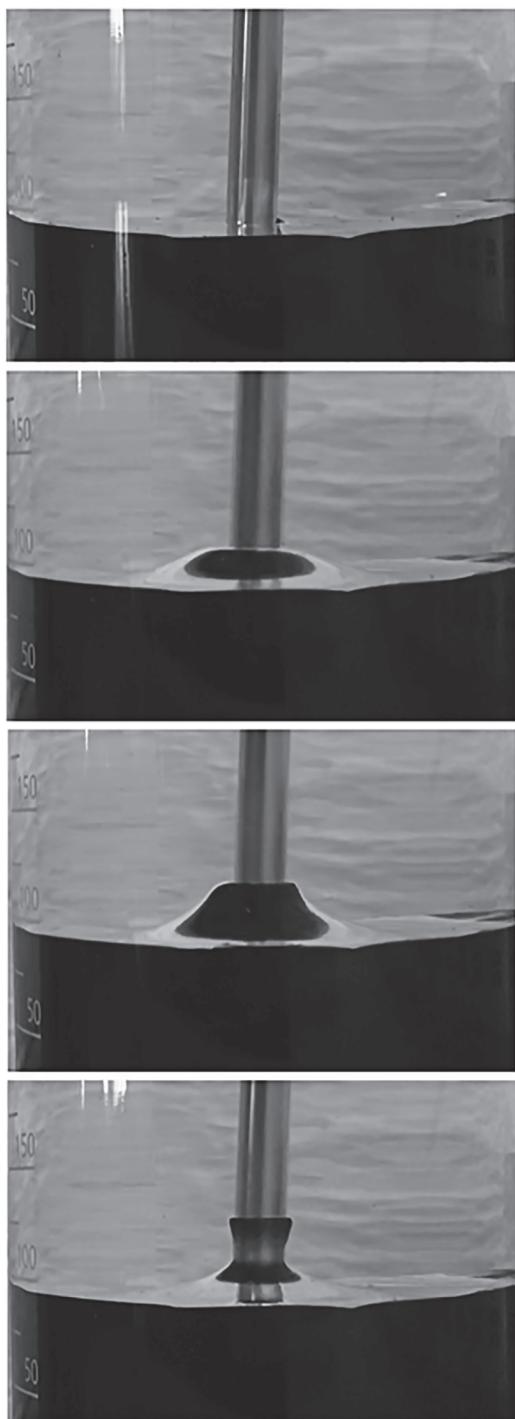
1 – rectangular line represents what is recorded with the lower camera, 2 – rectangular line represents what is recorded with the upper camera, 3 – digital speed display, 4 – ruler.

Rezultati

Na slici 3 prikazane su faze Vaisenbergovog efekta koje se smenjuju sa povećanjem ugaone brzine rotacije štapa. Pojava je posmatrana u silikonskom, suncokretovom, parafinskom i maslinovom ulju. Fizičke osobine korišćenih ulja date su u tabeli 1. Efekat je nestabilan u parafinskom ulju i slabo uočljiv u maslinovom, pa je pojava dalje ispitana sa silikonskim i suncokretovim uljem kao gornjom tečnošću. Ispitano je kako razlika prečnika posude i prečnika štapa utiče na pojavu efekta. Prečnik štapa je variran u opsegu od 18 do 63 mm. Dobijena je zavisnost ugaone brzine na kojoj se javlja efekat od prečnika unutrašnjeg cilindra (slika 5). Ova ugaona brzina, tj. prva kritična brzina, zavisi od vrste ulja i prečnika cilindara. Efekat se kod silikonskog ulja javlja na manjim ugaonim brzinama u odnosu na suncokretovo ulje. Za veće razlike između cilindara potrebna je veća ugaona brzina da bi se efekat pojavio. Rezultati su dobijeni na osnovu pet merenja. Primećeno je da se nakon određene ugaone brzine oblik podignute tečnosti menja, iz

Napomena uz slike 1 i 2. Modeli pojedinačnih elemenata (kamera, čaša, tripod stativ i ostalo) su preuzeti sa grabcad.com, besplatne online biblioteke CAD modela. Modeli modifikovani i postavljeni na odgovarajući način u programu Creo. Tako je dobijena je 3D šema aparature, na osnovu koje je izrađena 2D skica.

Notes to figures 1 and 2. Models of individual elements (camera, glass, tripod etc.) are downloaded from grabcad.com, a free online CAD model library. Models are modified and properly positioned in Creo. That is how the 3D scheme of the apparatus was obtained. The 2D sketch was extracted from the 3D scheme.

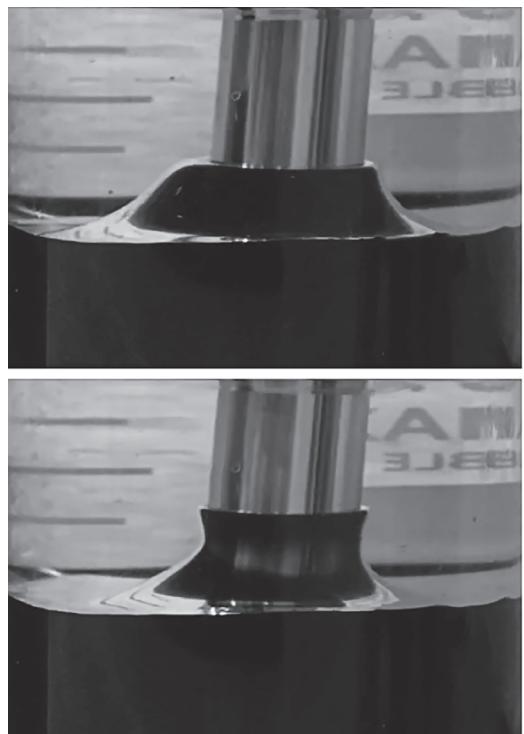


Slika 3 (levo). Fotografije efekta zabeležene sa prve kamere; promena visine i oblika tečnosti sa povećanjem ugaone brzine unutrašnjeg cilindra.

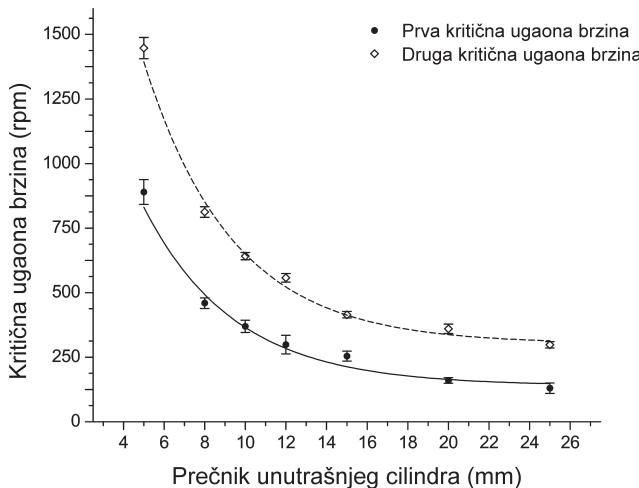
Figure 3 (left). Photographs of the effect recorded with the lower camera; change of height and shape of the interface between fluids with increasing rod velocity.

Slika 4 (dole). Promena oblika podignite tečnosti na drugoj kritičnoj brzini.

Figure 4 (below). Picture of flow becoming unstable at the second critical rotation rate.

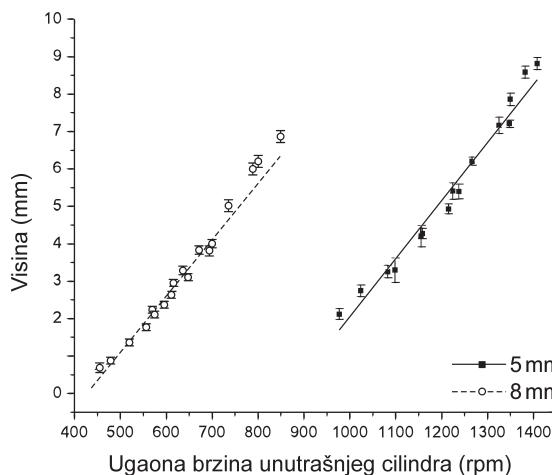


oblika trapeza u oblik koji podseća na mašnu (slike 4 i 9). U tom slučaju se na konstantnoj uganoj brzini ne dobija konstantna visina: visina stuba tečnosti polako raste i vremenom se iz donje u gornju tečnost odvajaju kapljice u obliku prstenova ili mehurića (slika 3). Ugaona brzina na kojoj se to dešava, druga kritična brzina, zavisi od razlike prečnika (slika 5). Promena oblika stuba tečnosti je zapažena u uljima u kojima je efekat stabilan.



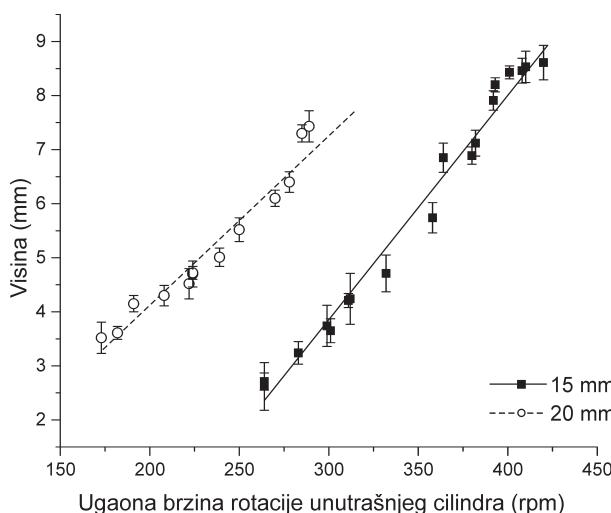
Slika 5. Zavisnost kritične ugaone brzine na kojoj se efekat javlja i zavisnost kritične ugaone brzine na kojoj tečnost menja oblik od prečnika unutrašnjeg cilindra.

Figure 5. Dependence of the first (black circle) and second (white rhombus) critical angular velocity versus rod diameter in silicon oil.



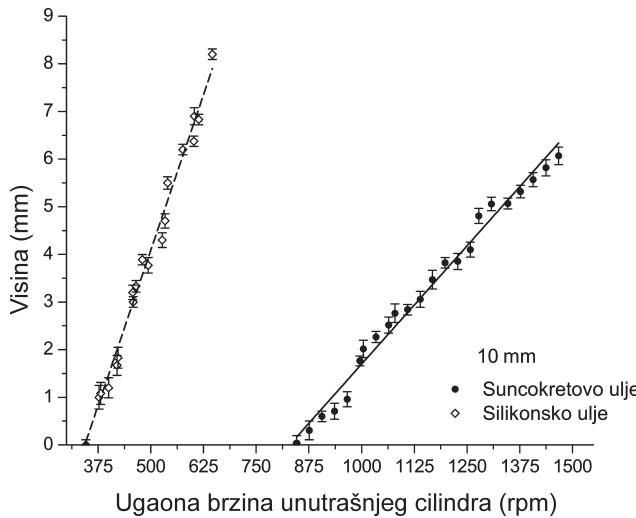
Slika 6. Grafik zavisnosti visine od ugaone brzine rotacije. Gornji fluid: silikonsko ulje 1; prečnici unutrašnjeg cilindra: 5 i 8 mm.

Figure 6. Dependence of height versus angular velocity of the rod diameter with silicone oil as the upper fluid. Diameters of the rod are 5 mm and 8 mm.



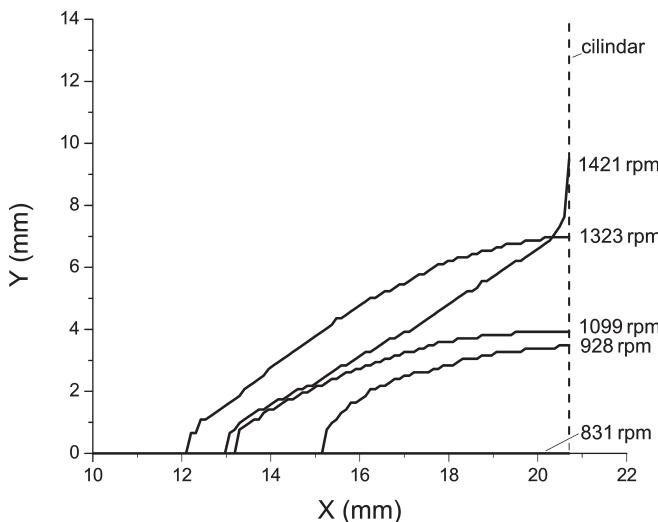
Slika 7. Grafik zavisnosti visine od ugaone brzine rotacije. Gornji fluid: silikonsko ulje 1; prečnici unutrašnjeg cilindra: 15 i 20 mm.

Figure 7. Dependence of height versus angular velocity of the rod diameter with silicone oil as upper fluid. Diameters of the rod are 15 mm and 20 mm.



Slika 8. Grafik zavisnosti visine od ugaone brzine rotacije. Gornji fluid: suncokretovo ulje, silikonsko ulje; prečnik unutrašnjeg cilindra: 10 mm.

Figure 8. Dependence of height versus angular velocity of the rod diameter with sunflower oil (black circle) and silicone oil (white rhombus) as the upper fluid. Diameter of the rod is 10 mm.



Slika 9. Prikaz oblika površinskog sloja tečnosti sa promenom brzine rotacije štapa.

Figure 9. Changes in shape of fluid meniscus with increasing velocity of the rod.

Posmatrana je promena visine stuba tečnosti u odnosu na ugaonu brzinu rotacije unutrašnjeg cilindra u silikonskom i suncokretovom ulju, koristeći štap prečnika 10 mm (slika 8). Efekat se u silikonskom ulju javlja na manjim brzinama nego što je to slučaj sa suncokretovim uljem i dostiže visinu od 7 mm na manjem intervalu brzine u odnosu na drugo ulje.

Ispitano je kako se menja visina stuba podignute tečnosti zavisno ugaone brzine rotacije unutrašnjeg cilindra koristeći različite prečnike i to 5 mm i 8 mm, 15 mm i 20 mm u silikonskom ulju (slike 6 i 7). Efekat se javlja na manjim brzinama ukoliko je prečnik unutrašnjeg štapa manji, što se zapaža na slici 5.

Diskusija

Promena visine stuba podignute tečnosti u zavisnosti od ugaone brzine rotirajućeg cilindra je posmatrana u ranijim radovima. U ovom radu je promena visine posmatrana u više eksperimenta u kojima su se koristili različiti prečnici unutrašnjeg cilindra. Rezultati pokazuju da prečnik unutrašnjeg cilindra znatno utiče na ugaonu brzinu na kojoj će se efekat javiti. Promena prečnika cilindra od samo nekoliko milimetara pravi uočljiv razliku između brzina na kojima će se efekat javiti – što je prečnik manji, to je potrebna veća brzina za nastanak efekta.

U cilju opisivanja na koji način viskoznost i gustina doprinose pojavi, vršeni su eksperimenti sa različitim uljima. Efekat nije uočljiv u maslinovom ulju zato što je meniskus između vode i maslinovog ulja previše zakriviljen na dole usled velikog kapilarnog pritiska, tj. male razlike u gustinama. Sa povećanjem brzine meniskus se polako ispravlja, a potom blago savija na gore. Maslinovo ulje, stoga, nije pogodno za posmatranje pojave. U suncokretovom i parafinskom ulju se dešava da nivo tečnosti blago osciluje zbog njihove male viskoznosti. Za posmatranje fenomena, najbolje su se pokazala silikonska ulja. Glavna razlika između suncokretovog i silikonskog ulja, kao gornje tečnosti, je viskoznost. Silikonsko ulje je mnogo viskoznije od suncokretovog, i iz tog razloga se teže meša sa vodom. Iz tog razloga se kapljice vode retko odvajaju tokom mešanja, a nivo podignute tečnosti pri rotaciji je stabilan i kompaktan.

Prema teorijski predviđanjima i rezultatima referentnog rada (Bonn *et al.* 2004), zavisnost visine podignute tečnosti i ugaone brzine je linearna, pa je takva zavisnost bila i očekivana. Linearna zavisnost izdizanja tečnosti od ugaone brzine rotacija cilindra dobijena je i u našem radu, ali taj trend važi samo do određenog trenutka. Na većim ugaonim brzinama, stub vode se izduži i prilepi uz cilindar, a nakon toga se dešava da se od donje tečnosti odvoji vodenih prstena koji se potom podiže uz štap većom brzinom nego stub tečnosti ranije. Zbog ovoga, efekat je posmatran samo do određene kritične brzine. Nakon što oblik podignute tečnosti promeni oblik, visina tečnosti na istoj ugaonoj brzini nije konstantna, kao što je to ranije bio slučaj. Naime, visina se nakon tog praga menja, odnosno raste, iako je ugaona brzina nepromenjena. Efekat je tada nestabilan, a pored odvajanja vodenih prstena, dolazi do postepenog mešanja tečnosti.

Na graficima uočavamo razlike koje se odnose na ugaonu brzinu cilindra pri kojoj dolazi do efekta tj. prvu kritičnu brzinu, brzinu podizanja tečnosti, maksimalnu visinu pre promene oblika stuba tečnosti i brzine na kojoj se promena dešava.

Još jedan cilj ovog rada bio je određivanje odnosa prečnika spoljašnjeg i unutrašnjeg cilindra na kom je i dalje moguće posmaranje efekta. Tokom snimanja pojave, najveći prečnik cilindra sa kojim se efekat može zapaziti u posudi prečnika 68 mm, je 25 mm kada je korišćeno sili-

konsko ulje, odnosno 20 mm kada je korišćeno suncokretovo ulje. Dakle, maksimalna razlika prečnika spoljašnjeg i unutrašnjeg cilindra na kome je efekat uočljiv iznosi približno 43 mm za silikonsko ulje tj. oko 65% prečnika posude, odnosno 48 mm tj. oko 70% prečnika posude za suncokretovo ulje. U referentnim radovima, razlika u prečnicima sa kojima je rađeno je veća od ovde dobijene najmanje razlike. Kada su korišćeni prečnici cilindara veći od 25 mm, efekat se nije pojavljivao ili se nije jasno uočavao zbog mešanja fluida. Iako je efekat uočljiv kada je prečnik unutrašnjeg cilindra oko 20 mm, često pokazuje neočekivano ponašanje. Dešava se da je stub podignite tečnosti nestabilan, blago osciluje ili ima nepravilan oblik, a do mešanja dolazi na nasumičnim brzinama. Ovo se objašnjava razlikom u prečnicima spoljašnjeg i unutrašnjeg cilindra koja je dovoljno mala da dolazi do pojave sporednih efekata koji utiču na manifestaciju Vajsenbergovog efekta.

Primećeno je da je ista eksperimentalna postavka koja je korišćena u ovom radu dovoljna za posmatranje još jednog fenomena. Kada cilindar rotira gotovo na površini gornjeg fluida tj. na površini ulja, voda se u obliku vrtloga uzdiže ka cilindru, a na određenim većim brzinama, vodeni vrtlog vertikalno osciluje unutar ulja. Pojava je poznata i ranije ispitivana (Fujimoto i Takeda 2009).

Zaključak

U ovom radu su ispitivane osobine Vajsenbergovog efekta koji nastaje pri rotaciji uskog vertikalnog štapa u posudi sa dve njutnovske tečnosti koje se međusobno ne mešaju. Rezultati eksperimenata pokazuju da Vajsenbergov efekat zavisi od vrste korišćenih fluida, razlike u prečniku posude i štapa, kao i od ugaone brzine štapa. Rezultati prikazani u ovom radu se slažu sa teorijom iz referentnih radova i određuju granice na kojima se efekat može posmatrati, opisujući šta se dešava na graničnim slučajevima.

Korišćena su ulja različitih osobina, a efekat se najbolje manifestuje kada je razlika u gustini i viskoznosti fluida velika. Jedan od uslova za pojavu efekta je da donja tečnost bude manje viskozna od gornje. Variranjem prečnika štapa koji rotira u posudi sa vodom i silikonskim uljem, odnosno suncokretovim uljem, je utvrđeno da maksimalna razlika prečnika posude i štapa na

kojoj je efekat uočljiv iznosi približno 65-70% prečnika posude. Brzina na kojoj se efekat javlja tj. prva kritična brzina zavisi od razlike prečnika, a što je ta razlika veća, efekat se javlja na manjim brzinama. Ispitivanjem efekta se pokazalo da sa porastom brzine, stub podignute tečnosti menjaju oblik i dobija drugačije osobine.

Vajsenbergov efekat u njutnovskim fluidima nalazi široku primenu u industriji, a njegova pojava i u nenjutnovskim fluidima, u specijalnom slučaju kada se u posudi nalaze dva fluida koja se ne mešaju, otvara nove mogućnosti za njegovu primenu u procesima povezanim sa emulzijama ili u nekim naizgled neočekivanim oblastima savremene tehnologije.

Literatura

Bonn D., Kobylko M., Bohn S., Meunier J., Morozov A., Saarloos W. 2004. Rod-climbing effect in Newtonian fluids. *Physical Review Letters*, **93**: 214503.

Dou H., Khoo B., Seng Yeo K. 2008. Instability of Taylor-Couette Flow between Concentric Rotating Cylinders. *International Journal of Thermal Sciences*, **47** (11): 1422.

Fujimoto S., Takeda Y. 2009. Topology changes of the interface between two immiscible liquid layers by a rotating lid. *Physical Review E*, **80**: 015304.

Mei X., Deng L., Sun D., Zhou Z., Wang L., Zhao Y., Wu D. 2017. Direct writing based on Weissenberg effect. U *International Conference on Manipulation, Automation and Robotics at Small Scales (MARSS)*. Montreal: IEEE, str. 92.

Nimmakayala M., Raju V. R. K. 2015. Numerical Simulation of Rod-Climbing Effect in Newtonian Fluids. *Procedia Engineering*, **127**: 405.

Petrović V. 2008. Ispitivanje osobina nenjutnovskog fluida napravljenog od skroba i vode. *Petničke sveske*, 64: 75.

Russell J. D. 1991. Taylor-Couette flow: The early days. *Physics Today*, **44** (11): 32.

Tanner R. I., Walters K. 1998. *Rheology: An Historical Perspective*. Elsevier

Weissenberg K. 1947. A Continuum Theory of Rheological Phenomena. *Nature*, **159**: 310.

Nina Jakovljević and Stefan Bukorović

Weissenberg Effect in Newtonian Fluids

The Weissenberg effect occurs when a rotating rod is immersed into a beaker filled with two immiscible fluids. The effect can be understood in terms of the occurrence of a flow instability which make the meniscus climb the rod. This paper examines how the change of the rod diameter and rotation rate affect the height and shape of the interface between the two fluids. The differences in diameters of the container and rotating rod were in a range from 18 mm to 63 mm, with the maximum angular velocity of the rotating rod 2500 rotations per minute. The fluids used were distilled water in combination with various types of oils. The results show that the diameter of the rotating rod plays a significant role in this effect: the minimum angular velocity needed for the effect to occur is greater when the rod diameter is lower. If the difference in diameters exceeds 43 mm, the effect does not occur and the fluids start to mix. The results obtained show that the height of the interface between the two fluids depends linearly on the angular velocity of the rod. This dependency exists only up to a critical velocity after which the dependency is not linear and the effect loses its former form. We find that the onset of rod climbing depends on fluid characteristics.

