

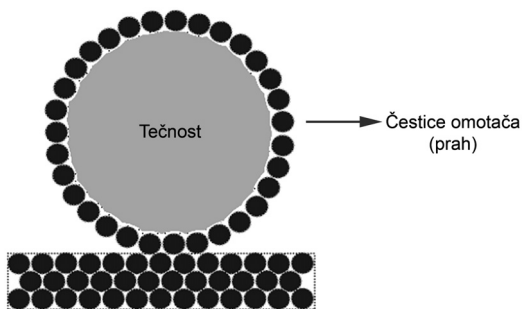
Ispitivanje statičkih i dinamičkih osobina tečnih klikera

Proučavane su statičke i dinamičke osobine tečnih klikera kod kojih je za čestice omotača korišten grafitni prah, a za unutrašnjost glicerol ili voda. Iz oblasti statike dobijene su linearne zavisnosti dužine za koju se spusti centar mase od poluprečnika i kontaktne dužine od poluprečnika. Klikeri su puštani niz strmu ravan pri uglovima od 13° i 18° i posmatrana je zavisnost brzine od poluprečnika. Pri uglu od 18° klikeri su postizali konstantnu brzinu, koja je obrnuto srazmjerna njihovom poluprečniku, dok pri uglu od 13° klikeri usporavaju sve vrijeme na posmatranom dijelu strme ravni. Takođe je posmatrana i promjena oblika klikera pri kretanju u zavisnosti od toga da li su napravljeni od glicerola ili vode.

Uvod

Tečni klikeri predstavljaju kap odgovarajuće tečnosti obavijenu česticama praha čiji je prečnik reda veličine mikrona (slika 1). Oko kapi se može formirati jedan ili više slojeva, što zavisi od veličine čestica, ali i od osobine tečnosti i praha. Za pravljenje tečnih klikera mogu se koristiti hidrofobni i hidrofilni prahovi (Bormashenko 2011). Između hidrofilnih čestica i vode djeluju privlačne sile, tako da se one priljepe za površinu kapi. Iako hidrofobne supstance imaju osobinu da odbijaju vodu, od njih je moguće formirati tečni kliker. Ova pojava se dešava zbog toga što se ukupna energija sistema smanji kada se čestice rasporede po površini kapi.

Istraživanja u oblasti tečnih klikera su počela prije dvadesetak godina. Iako predstavljaju noviju oblast u nauci, proučavani su mnogi faktori koji utiču na tečne klikere, ali još uvijek im nisu ispitane i u potpunosti objašnjene sve osobine. Neke od osobina koje su ispitivane su: statika, dinamika, uticaji zvuka, električnog i magnetnog polja. Zbog specifičnih osobina koje pokazuju, svoju primjenu bi mogli pronaći u biologiji, medicini, hemijskoj tehnologiji kao mikrorezervoari, gasni senzori, detektori zagađenosti vode, prenosioci lijekova (Bormashenko 2011).



Slika 1. Tečni kliker

Figure 1. Liquid marble

Ovaj rad se bavi istraživanjem statičkih i dinamičkih osobina, te osobinama praha od kog se tečni klikeri mogu dobiti. Ispitano je kretanje klikera od glicerola niz strmu ravan. Posmatrane je promjene oblika tečnih klikera pri kretanju i ispitane zavisnosti brzine i ubrzanja od prečnika klikera. Istraživanja tečnih klikera do sada nisu rađena u ISP.

Jelena Marković (1994), Prijedor (RS, BiH),
Žarka Zgonjanina 25, učenica 4. razreda
Gimnazije „Sveti Sava” u Prijedoru

Zoran Šukurma (1995), Brod (RS, BiH),
Mokranjčeva 8, učenik 3. razreda Srednje škole
„Nikola Tesla” u Brodu

MENTORI:

Stefan Badža, student Fizičkog fakulteta
Univerziteta u Beogradu

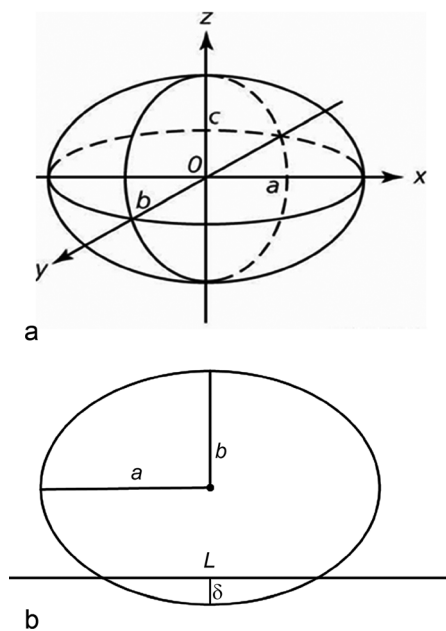
Vladan Pavlović, PMF, Univerzitet u Nišu

Statičke osobine tečnih klikera

Kada se tečni kliker nađe na ravnoj površini na njega djeluju dvije sile: sila gravitacije i površinski napon. Površinski napon teži da smanji slobodnu površinu tj. teži da kliker ima sferan oblik. Nasuprot površinskog napona, djeluje sila gravitacije koja teži da spljošti kliker. Ove dvije sile su u ravnoteži kada kliker ima poluprečnik jednak kapilarnoj dužini:

$$R = k^{-1} = \sqrt{\frac{\rho}{g}} \quad (1)$$

gdje je R poluprečnik tečnog klikera, k^{-1} kapilarna dužina, γ koeficijent površinskog napona i ρ gustina tečnosti (Aussillous i Quere 2006). Ako je $R < k^{-1}$, dominantnija sila je površinski napon, kliker ima približno sferan oblik i naziva se kap. U slučaju da je $R > k^{-1}$, gravitacioni uticaj je dominantan usljed čega se kliker spljošti. Ovi klikeri se nazivaju „barice”. Na slici 2a prikazane su poluose tečnog klikera a , b , c , a na



Slika 2. a) elipsoid; b) Tečni kliker na čvrstoj površini.

Figure 2. a) ellipsoid; b) Liquid marble at a solid state.

slici 2b je šematski prikaz klikera. L je dužina kontakta između klikera i podloge, δ dužina za koju se spusti centar mase.

Gravitacija spljošti kliker usljed čega se smanji poluosa b . Poluose a i c se smatraju jednakim $a = c$, dok se srednji poluprečnik računa po formuli:

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} \quad (2)$$

gdje je V zaprvina tečnog klikera koja se može dobiti i iz relacije:

$$V = \frac{4}{3} a^2 b \pi \quad (3)$$

Kontakta dužina L i dužina za koju se spusti centar mase δ , za kapi su redom (Bormashenko 2011):

$$L \propto R^2 k \quad (4)$$

$$\delta \propto R^3 k^2 \quad (5)$$

a kontaktna dužina L kod barica:

$$L \propto \sqrt{R^3 k} \quad (6)$$

Dinamika tečnih klikera

Za razliku od kapi tečnosti, tečni klikeri se mogu kotrljati po strmoj ravni. Ovo je omogućeno time što između površine čvrstog tijela na kom se nalaze i tečnosti postoji tanak sloj praha (i vazdušnih džepova) te je sila adhezije jednaka nuli.

Kretanje tečnih klikera niz strmu ravan opisuje se jednačinama mehanike fluida, čija se rješenja ne mogu naći analitički (Aussillous i Quéré 2004). Tečni klikeri visoko-viskozni tečnosti, pri malim uglovima, se, poslije nekog vremena, kreću ravnomjerno. Klikeri manjeg poluprečnika (a samim tim i manje mase) se kreću brže. Kod većih klikera dominantnija je sila gravitacije, dodirna površina značajno veća, te se povećava klizanje klikera. Brzina kapi se povećava sa smanjenjem poluprečnika, dok je kod barica brzina nezavisna od poluprečnika. Izraz za kretanje kapi kod visoko-viskozni tečnosti na malim uglovima je (Aussillous i Quéré 2004):

$$v \propto \frac{\gamma}{\eta} \cdot \frac{k^{-1}}{R} \cdot \sin \alpha \quad (7)$$

Aparatura i metod

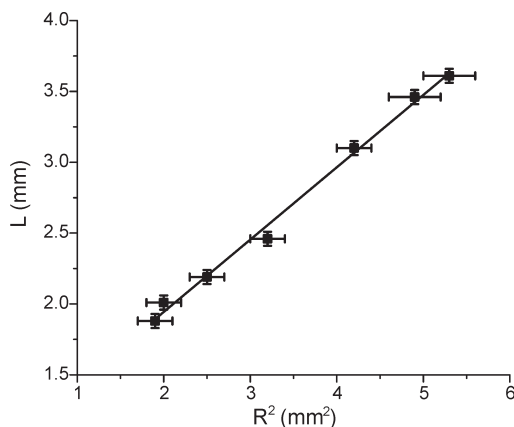
Tečnosti koje su korištene za pravljenje tečnih klikera su glicerol i voda. Ove dvije supstance su izabrane zbog toga što glicerol ima oko 1500 puta veći koeficijent viskoznosti, dok je odnos gustina i koeficijentata površinskog napona (tabela 1).

Tabela 1. Osobine tečnosti od kojih su pravljeni tečni klikeri

Tečnost	ρ (kg/m ³)	γ (mN/m)	η (mPas)
Glicerol	1270	63.4	1500
Voda	1000	72.5	0.894

ρ – gustina, γ – koeficijent površinskog napona, η – koeficijent viskoznosti

Za čestice omotača korišteni su prahovi iz dva tonera za crno bijeli laserski štampač (Toner Cartridge Euro for HP LJ 5P, 6P SNm EDV-405500), ali su se klikeri mogli napraviti samo od jednog. Infracrvenom spektroskopijom utvrđeno je da prahovi imaju isti hemijski sastav. Osnovni sastojak je grafit, iako su prisutni i drugi sastojci poput željeznog oksida.



Slika 3. Zavisnost kontaktne dužine od kvadrata poluprečnika kod glicerolskih kapi

Figure 3. Size of the contact zone as a function of the square of the radius of glycerol marbles

Urađena su posmatranja praha pod mikroskopom. U jednom prahu je bilo nečistoća (dlačice i slično), tako da je to moguć razlog zbog čega se klikeri nisu mogli napraviti od njega.

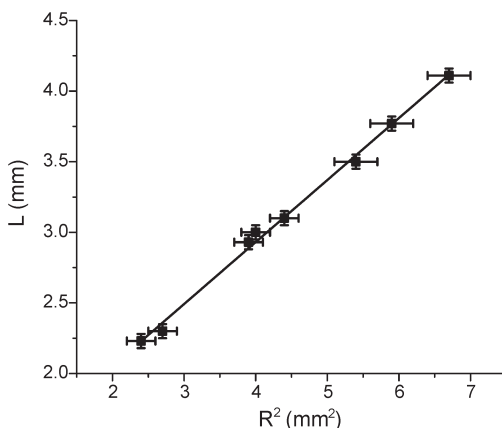
Kapi su pravljene pomoću šprice, a potom su kotrljane po površini prekrivenoj prahom. Laganim pomijeranjem kapi prah se lijepi za njenu površinu i formira se tečni kliker. Kliker se dovođi do početka strme ravni te se počinjje kretati niz nju.

Klikeri su fotografisani u vertikalnoj i horizontalnoj ravni pri mirovanju i pri kretanju. Analiza fotografija urđena je u programu GIMP2. Da bi odredili brzine klikeri su snimani pri kretanju. Brzina je računata preko pređenog puta između dva frejma, a obrada je rađena u MATLAB-u. Milimetarski papir je zalijepljen u blizini klikera, i predstavlja uporednu veličinu pomoću koje se određuje tražena dužina.

Rezultati i diskusija

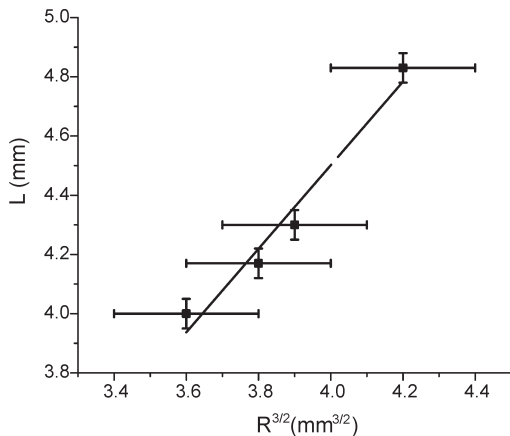
Statičke osobine tečnih klikera

Kapilarna dužina za tečne klikere napravljene od glicerola je $k^{-1} = 2.25$ mm, a za vodene klikere $k^{-1} = 2.72$ mm. Na slici 3 prikazana je zavisnost kontaktne dužine L od kvadrata poluprečnika (R^2), za kapi ($R < k^{-1}$) napravljene od



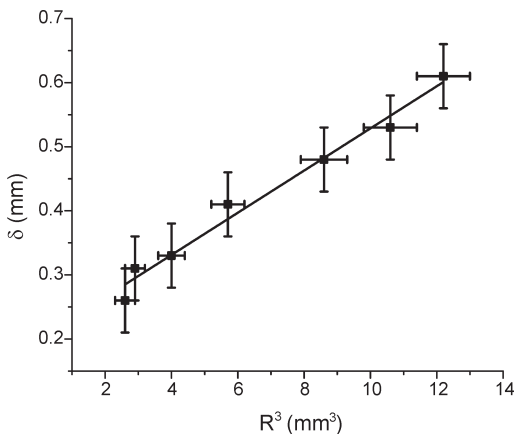
Slika 4. Zavisnost kontaktne dužine od kvadrata poluprečnika kod vodenih kapi

Figure 4. Size of the contact zone as a function of the square of radius of water marbles



Slika 5. Zavisnost kontaktne dužine od L kod glicerolskih barica od poluprečnika

Figure 5. Size of the contact zone as a function of the radius of glycerol puddles

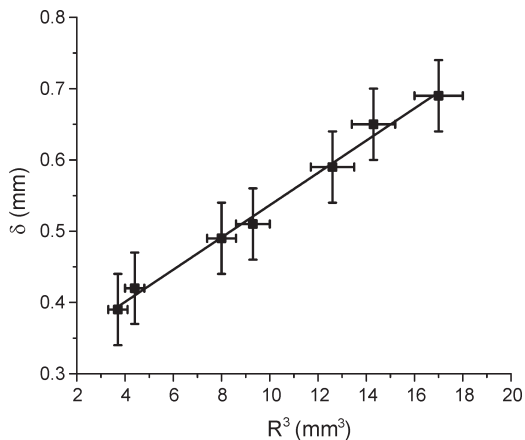


Slika 6. Linearna zavisnost dužine δ za koju se spusti centar mase od kuba poluprečnika za glicerolske kapi

Figure 6. Lowering of the center of the marble as a function of the cube of the radius of glycerol marbles

glicerola, kao što je predviđeno po formuli (4). Slika 4 prikazuje istu zavisnost za vodene klikere. Zavisnost za barice ($R > k^{-1}$) za glicerol, predstavljena je na slici 5, a svi vodeni klikeri koji su napravljeni imali su $R < k^{-1}$.

Na slikama 6 i 7 prikazana je linearna zavisnost dužine za koju se spušta centar mase klikera δ od kuba poluprečnika R^3 za „kapi”, koja je pre-



Slika 7. Linearna zavisnost δ dužine za koju se spusti centar mase od kuba poluprečnika za vodene kapi.

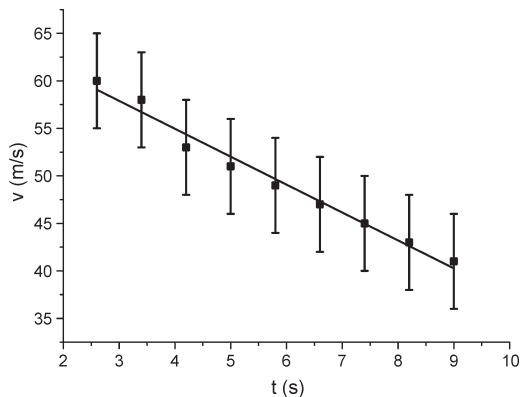
Figure 7. Lowering of the center of the marble as a function of the cube of the radius of water marbles

dviđena po formuli (5). Na slici 8 predstavljeni su rezultati za tečne klikere pravljene od glicerola, a na slici 9 za klikere napravljene od vode.

Sa grafika na slikama 3 i 4 dobija se da kontaktna dužina L linearno raste sa kvadratom poluprečnika „kapi”. Sa grafika na slici 5 dobija se linearna zavisnost istih veličina samo kod „barica”. Dobijeni rezultati se slažu sa teorijskim modelom i rezultatima koje su dobili i Aussilous i Quéré (2004) i Bormashenko (2011). Fit prave sa grafika 3 i 4, te grafika 6 i 7, imaju približno jednake nagibe jer glicerol i voda imaju približno jednake vrijednosti za koeficijent površinskog napona (63 mN/m za glicerol i 72.5 mN/m za vodu) i kapilarnu dužinu (2.25 mm za glicerol i 2.72 mm za vodu), koje figurišu u formulama za računanje kontaktne dužine i dužine za koju se spušta centar mase klikera (4, 5, 6).

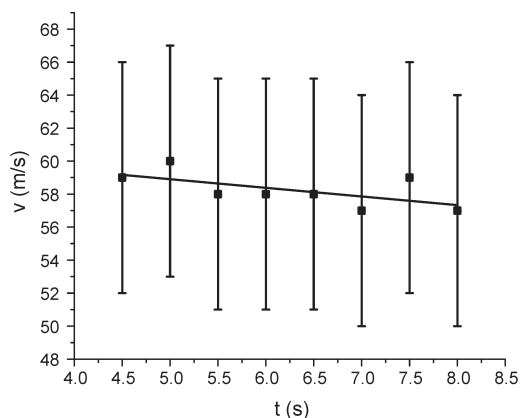
Dinamika tečnih klikera

Za ispitivanje dinamičkih osobina tečnih klikera korišten je glicerol, zbog velike viskoznosti. Mjerenja su vršena pri uglovima od 13° i 18°. Pri uglu od 13°, tečni klikeri su na početku ubrzavali te poslije određenog vremena počeli da usporavaju konstantnim usporanjem (slika 8). Smatra se da na posmatranom dijelu strme ravni, tečni klikeri još nisu ušli u režim ravnomjernog kre-



Slika 8. Zavisnost brzine tečnog klikera od vremena pri uglu od 13°

Figure 8. Velocity of a liquid marble as a function of time at a 13 degree incline

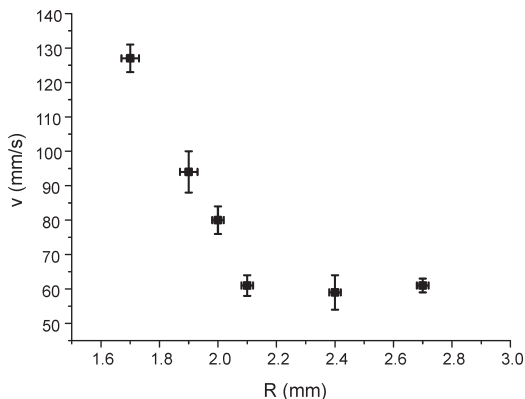


Slika 9. Zavisnost brzine tečnog klikera od vremena pri uglu od 18°

Figure 9. Velocity of a liquid marble as a function of time at a 18 degree incline

tanja, te da bi poslije nekog vremena svoje kretanje morali nastaviti konstantnom brzinom. U slučaju da ne postižu konstantnu brzinu, tečni klikeri bi se morali zaustaviti na strmoj ravni uprkos djelovanju aktivne komponente gravitacione sile.

Pri uglu od 18° , tečni klikeri su se napočetku ubrzavali i u jednom trenutku postizali konstantnu brzinu (slika 9). Ovakvi rezultati se slažu sa rezultatima iz drugih radova (Aussillous i Quéré



Slika 10. Zavisnost brzine tečnog klikera od poluprečnika pri uglu od 18°

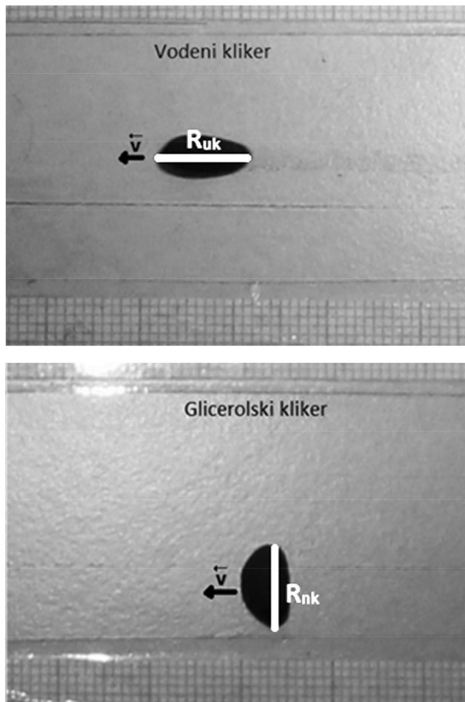
Figure 10. Velocity of a liquid marble as a function of a radius at a 18 degree incline

2004; 2006). Kako su pri uglu od 18° tečni klikeri postizali konstantnu brzinu, tražena je zavisnost brzine tečnog klikera od poluprečnika. Dobijeno je da važi pretpostavka da je brzina klikera obrnuto proporcionalna poluprečniku klikera (7) (slika 10).

Deformacija tečnih klikera

Tečni klikeri se deformišu pri kretanju niz strmu ravan. Uočeno je da deformacija zavisi od tečnosti, ugla stme ravni, podloge i veličine klikera. Za proučavanje promjene oblika korišteni su klikeri od vode i glicerola. Klikeri od vode se izdužuju u pravcu kretanja, a klikeri od glicerola normalno na pravac kretanja (slika 11). Razlog za ovako različite načine deformacije kod glicerola i vode je velika razlika u viskoznosti. Kod vodenih tečnih klikera, sile viskoznosti između slojeva tečnosti su veoma male, tako da ti slojevi postižu velike brzine i zbog toga se izdužuju u pravcu kretanja. Kod glicerolskih klikera su prisutne mnogo veće viskozne sile tako da se izdužuju normalno na pravac kretanja.

Kada se povećavao nagib strme ravni, vodeni tečni klikeri su se sve više deformisali, njihov prečnik u pravcu kretanja (R_{uk}) je postajao i duplo veći u odnosu na prečnik normalan na pravac kretanja (R_{nk}). Za kliker poluprečnika 1.9 mm, odnos R_k/R_{nk} pri uglu od 11° bio je 1.9, dok je za ugao od 21° bio 2.4. Primijećeno je da postoji



Slika 11. Klikeri u kretanju: vodeni (gore) i glicerolski (dole)

Figure 11. Moving liquid marbles: water (up) and glycerol (down)

određeni ugao na kome su se vodeni klikeri deformisali u toj mjeri da su se raspadali. Na podlozi od šperploče, tečni klikeri poluprečnika 2 mm su se raspadali već pri uglu od 26° .

Klikeri od glicerola, izdužuju se u pravcu normalnom na pravac kretanja. Odnos prečnika kod glicerola R_{nk}/R_{uk} bio je maksimalno 1.7 za kliker polurečnika 2.5 mm pri uglu od 11° . Sa povećanjem ugla, glicerolski tečni klikeri su postajali sve brži i povećavao im se prečnik u pravcu kretanja (R_k). Tako za glicerolski kliker poluprečnika 1.9 mm odnos R_{nk}/R_{uk} pri 11° je bio 1.4 a pri uglu od 26° 1.2. Na malim nagibima strme ravni ($2-3^\circ$) glicerolski klikeri koji su se kretali po podlozi od šperploče su se raspadali. Kada se podloga promijenila, i koristila se metalna podloga, klikeri su se mogli kretati. Tako se zaključuje da podloga po kojoj se kreću klikeri takođe utiče na njihov oblik i brzinu.

Zaključak

U radu je prikazana analiza promjene oblika tečnih klikera pri kretanju niz strmu ravan. Ustanovljeno je da nečistoće u prahu mogu spriječiti formiranje tečnih klikera. Rezultat za ugao od 18° je u skladu sa dosadašnjim istraživanjima, dok za rezultat pri 13° nisu pronađene adekvatne reference. U daljem istraživanju bilo bi značajno ispitati kretanje klikera na dužim trajektorijama, kako bi se utvrdilo da svi tečni klikeri postižu režim ravnomjernog kretanja. Takođe, treba se utvrditi pri kom maksimalnom uglu, tečni klikeri mogu postići konstantnu brzinu. Detaljnije bi se moglo proučiti kretanje na različitim podlogama i za različite kombinacije tečnost-prah.

Zahvalnost. Zahvaljujemo Danielu Siladiju za pomoć pri obradi fotografija u MATLAB-u.

Literatura

- Aussillous P., Quéré D. 2004. Shapes of rolling liquid drops. *Journal of fluid mechanics*, **512**: 133.
- Aussillous P., Quéré D. 2006. Propertis of liquid marbles. *Proceedings of royal society A*, **462**: 973.
- Bormashenko E. 2011. Liquid marbles: Properties and applications. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, **16** (4): 266.
- Bormashenko E., Pogreb R., Musin A. 2012. Stable water and glycerol marbles immersed in organic liquids: From liquid marbles to Pickering-like emulsions. *Journal of Colloid and Interface Science*, **366**: 196.
- De Gennes P-G., Brochard-Wyart F., Quéré D. 2004. *Capillarity and wetting phenomena: drops, bubbles, pearl, waves*. Springer
- Mahadevan L., Pomeau Y. 1999. Rolling droplets. *Physics of fluids*, **11**: 9.

Study of Static and Dynamic Properties of Liquid Marbles

This paper deals with the study of static and dynamic properties of liquid marbles, as well as the characteristics of the powder from which they can be produced. Graphite powder was used as the particle wrapper, and water and glycerol were used as filling for liquid marbles. Based on the static of liquid marbles, we have obtained linear dependencies of length for which the center of mass is lowered (Figures 6 and 7) and the contact length of the radius (Figures 3, 4, and 5). Marbles were released down an inclined plane at angles of 13° and 18° and the speed dependence in relation to the radius. At the angle of 18° marbles achieve a constant rate (Figure 9), which is inversely proportional to its radius (Figure 10), as was predicted in other studies (Aussillous & Quéré 2006). At the angle of 13° marbles constantly slow down on the observed part of the incline (Figure 6). We have also observed the change in shape for both glycerol and water marbles during motion (Figure 11). Liquid marbles have not been studied in detail and they could have wider application. This research is very important because it gives detailed insight into their characteristics. 