

Ispitivanje osobina smeše granularnih materijala i ulja

U ovom radu je proučavano kretanje smeše dve vrste granularnih materijala i ulja niz strmu ravan. Ispitan je uticaj promene nagiba strme ravni na stvaranje klastera od granula, grananje smeše i segregaciju granula. Takođe, razmatrano je ponašanje smeša ulja sa po jednom od vrsta granula koje čine komponente smeše. Pokazano je da raspodela veličine klastera po strmoj ravni zavisi od nagiba strme ravni, što smatramo da je posledica toga što klasteri nastaju na drugačiji način. Primećena je segregacija granula kao i grananje smeše pri nekim vrednostima nagiba strme ravni.

Uvod

Granularni materijal se definiše kao skup čvrstih čestica dovoljno velikih dimenzija da termalna energija kojom raspolažu ne može da izazove njihovo kretanje. Glavna karakteristika ovih materijala je da pri međusubnoj interakciji granula dolazi do gubitaka energije (Aranson i Tsimring 2006). Kad se izazove kretanje ovakvog sistema čestica, pri određenim uslovima, čestice se ponašaju na krajnje neintuitivan način, pri čemu dolazi do interesantnih fenomena kao što je formiranje neobičnih paterna od granula. Jedan od problema koji je u poslednje vreme dosta izučavan iz oblasti granularnih materijala bavi se opisivanjem ponašanja smeša granularnih materijala i tečnosti koje su puštene da teku niz strmu ravan (Lee *et al.* 2014). Utvrđeno je da se ovakvi sistemi nalaze u jednoj od tri faze koje se odnose na kretanje granula u odnosu na tečnost – granule ili zaostaju za tečnosti ili se

formira debeli sloj granula na frontu, a postoji i međufaza u kojoj su one ravnomerno raspoređene po smeši. Smeša se nalazi u različitoj fazi u zavisnosti od koncentracije granula u smeši i nagiba strme ravni. Većina radova iz ove oblasti se bavi postavljanjem novog modela kojim takvo ponašanje može da se objasni (Zhou *et al.* 2005).

Manje pažnje je obraćeno na fenomene kao što su segregacija različitih vrsta granula, klasterovanje granula kao i grananje fronta smeše pri ovakvoj postavci eksperimenta, iako je utvrđeno da pri nekim uslovima dolazi do njih. Segregacija predstavlja odvajanje različitih vrsta granula u okviru smeše. Pokazano je da u smešama koje se sastoje od dve vrste granula različitih gustina i ulja dolazi do segregacije pri određenim nagibima strme ravni i koncentraciji granula (Lee *et al.* 2014). Do segregacije dolazi iz više razloga – za dovoljno velike uglove granule manje gustine se gomilaju pri frontu tečnosti, iako nije poznato zašto, dok se za manje uglove gušće granule odvajaju pri početku strme ravni.

Do grananja smeše dolazi kad se front smeše „pocepa” na odvojene „prste”. Poznato je da do ovog fenomena dolazi u slučaju kretanja same tečnosti niz strmu ravan (Carlo *et al.* 2001). Kod smeša granula i tečnosti je primećeno da, pri dovoljno velikom nagibu strme ravni, granule nagomilane po ivici tečnosti otežavaju grananje (Cook 2007). Još jedna pojava koja je primećena je formiranje klastera tj. skupa granula koje su grupisane u celinu tako da se zajedno kreću niz strmu ravan (Lee *et al.* 2014). Pojava klastera u smeši u velikoj meri zavisi od izbora granularnog materijala i u pomenutim radovima nije bila to-

Sara Bogojević (1995), Beograd, Gospodar Jovanova 18, učenica 4. razreda Matematičke Gimnazije u Beogradu

Petra Šešelja (1996), Novi Sad, Kružna 2, učenica 3. razreda Gimnazije „Jovan Jovanović Zmaj” u Novom Sadu

MENTORI:

dr Slobodan Vrhovac, Institut za fiziku, Beograd,

Marko Kuzmanović, Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu

liko izražena. Parametri koji mogu da imaju uticaj na navedene fenomene su nagib strme ravni (čime se menja komponenta gravitacione sile koja dovodi do kretanja), koncentracija granula u smeši kao i karakteristike samih komponenata. Cilj ovog rada je ispitivanje uticaja nagiba strme ravni na tok smeše sa dve različite vrste granula i uljem, tj. na pojavu segregacije, formiranja klastera i grananja smeše.

Aparatura i metod

Aparatura koja je korišćena u eksperimentu se sastoji od drvenog postolja na koju je stavljena staklena ploča širine 25 cm i dužine 85 cm, postavljena tako da ploča predstavlja strmu ravan. Nagib strme ravni je bilo moguće menjati, u granicama od 10° do 50° . Merenja su vršena za nagibe strme ravni od $(12.3 \pm 0.5)^\circ$, $(20.3 \pm 0.3)^\circ$, $(35.2 \pm 0.2)^\circ$ i $(43.2 \pm 0.2)^\circ$.



Slika 1. Aparatura

Figure 1. Apparatus

Za komponente smeše uzete su granule mlevene kafe i šećera i suncokretovo ulje. Komponente su tako izabrane jer ih je lako razlikovati u smeši zbog različite boje.

Tabela 1. Komponente smeše

Komponenta	Gustina [kg/m^3]	Prečnik granula [mm]
Kafa	1000 ± 300	0.13 ± 0.07
Šećer	1600 ± 500	0.75 ± 0.07
Suncokretovo ulje	830 ± 120	–

Zapreminski udeo kafe, šećera i suncokretovog ulja u smeši u svakom od merenja je bio 20%, 20% i 60%, respektivno. Ukupna zapremina svake smeše je bila 100 ± 5 mL. Smeše su pripremane tako što je odmerena zapremina svake od komponenti, zatim su dobro promešane kako bi bile što više homogene, i potom su puštane iz posude koja je postavljena na vrh strme ravni. Posuda je otvarana polako, da bi se izbeglo da smeša ima početnu brzinu. Nakon što su smeše puštene, ostavljene su neko vreme dok većina ulja ne istekne kako bi se jasno videle granule na strmoj ravni, zatim su fotografisane. Merenja su vršena za četiri različita ugla strme ravni i ponovljena pet puta za svaki ugao.

Ovako dobijene fotografije obrađene su računarski: prvo je kontrast lokalno pojačan (CLAHE pristupom), fotografija je prebačena u HSV prostor i granule su lokalizovane na osnovu S kanala, pa su regioni pokriveni granulama izdvojeni H-maxima transformacijom i na kraju je izvršena binarizacija. Na kraju je primenjena morfološka erozija kako bi se sa fotografije uklonili mali objekti i razdvojile slabo povezane komponente. Klasterima su smatrane povezane komponente na binarizovanoj slici, a primenom standardnih algoritama moguće je odrediti površine i koordinate centra mase.

Za svaku od fotografija je dobijen grafik zavisnosti površine klastera od položaja centra mase klastera na dužoj osi strme ravni. Takođe, za svaku horizontalu na svakoj slici je određena relativna popunjenost granulama na toj visini, koja predstavlja količnik broja tačaka na toj visini koji pripadaju nekom klasteru i širine traga smeše koji ostaje na strmoj ravni una toj visini. Tako su dobijeni i grafici zavisnosti relativne popunjenosti horizontale klasterima u zavisnosti od visine na strmoj ravni na kojoj se horizontala nalazi.

Rezultati i diskusija

Kao što je već rečeno, u eksperimentu je posmatran uticaj nagiba strme ravni na tri pojave – stvaranje klastera, grananje smeše i segregaciju. Pored toga, razmatrano je i ponašanje smeša kafe i suncokretovog ulja i šećera i ulja u odeljku komponente smeše.



Slika 2. Smeša za uglove 12.3° , 20.3° , 35.2° , 43.2° sa leva na desno, gornji kraj slike predstavlja početak strme ravni

Figure 2. The mixture for angles of 12.3° , 20.3° , 35.2° , 43.2° , from left to right respectively, the upper part of the image represents the beginning of the slope

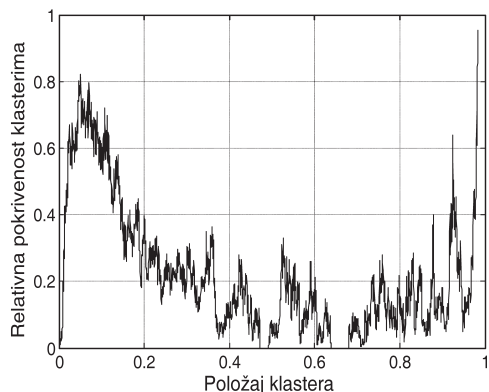
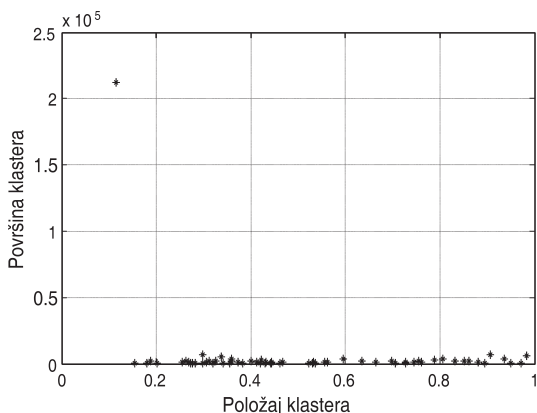
Formiranje klastera

Na slici 2 su prikazane fotografije smeša, za sva četiri ugla. Na slici 3 je prikazana slika posle obrade za ugao 35.2° , gde su različitim bojama označeni različiti klasteri.

U toku eksperimenta, primećeno je da pri većim uglovima (35.2° , 43.2°) veličina klastera raste od početka, odnosno od vrha strme ravni do kraja, kao i da su međusobna rastojanja klastera pri vrhu strme ravni manja nego pri dnu za ova dva ugla. Za manje uglove (12.3° , 20.3°), međutim, dolazi do suprotnog trenda – veličina klastera je najveća na početku strme ravni i kasnije opada (slika 2). U ovom slučaju nema smisla govoriti o međusobnim rastojanjima klastera, jer granice klastera ne mogu jasno da se definišu.

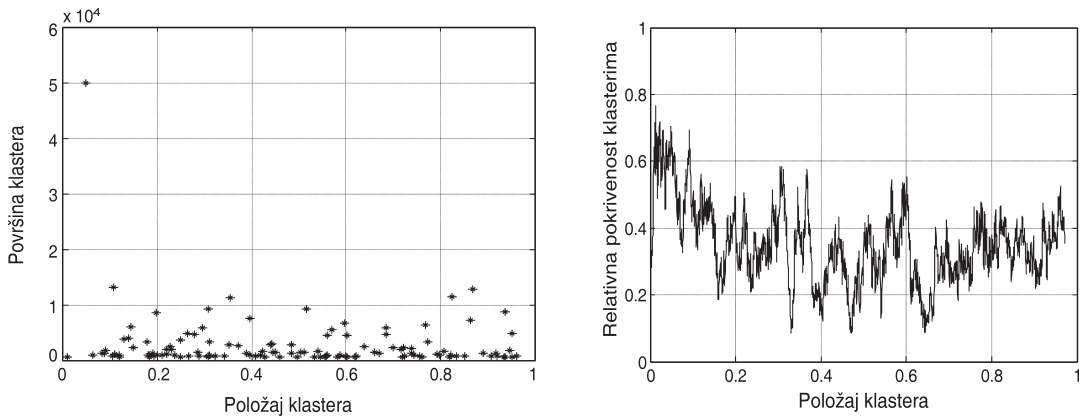
Na slikama 3-6 su prikazani grafici zavisnosti površine klastera od položaja centra mase na strmoj ravni, kao i relativna popunjenost klasterima za jedno od merenja za svaki ugao pojedinačno.

Na osnovu ovih grafika vidimo da se za najmanji ugao, pri vrhu strme ravni formira jedan kompaktan klaster izuzetno velike površine, dok se u ostatku strme ravni pojavljuje mali broj dosta sitnijih klastera. Relativna popunjenost klasterima opada od vrha do sredine strme ravni, i onda ponovo raste (doduše sporije) od sredine ka kraju strme ravni.



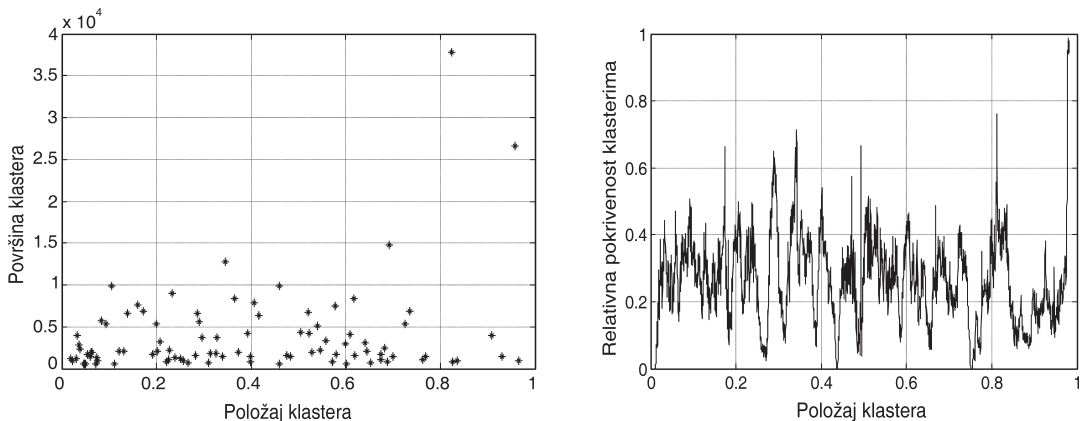
Slika 3. Grafici zavisnosti površine od položaja klastera (levo) i relativne popunjenosti od položaja (desno) za ugao 12.3°

Figure 3. Graphs representing the dependence of the surface of the cluster on its position (left) and relative fullness on the position (right) for the 12.3° angle



Slika 4. Grafici zavisnosti površine od položaja klastera (levo) i relativne popunjenosti od položaja (desno) za ugao 20.3°

Figure 4. Graphs representing the dependence of the surface of the cluster on its position (left) and relative fullness on the position (right) for the 20.3° angle



Slika 5. Grafici zavisnosti površine od položaja klastera (levo) i relativne popunjenosti od položaja (desno) za ugao 35.2°

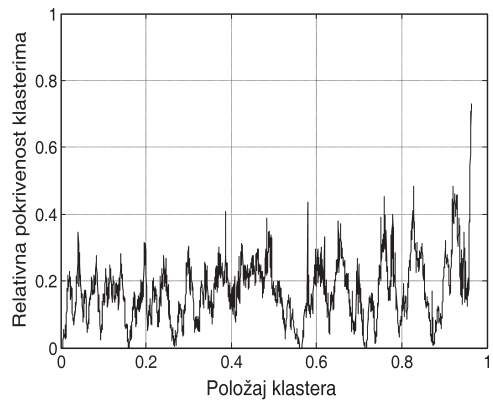
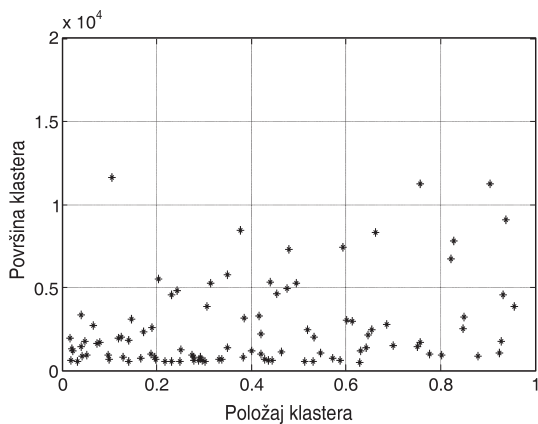
Figure 5. Graphs representing the dependence of the surface of the cluster on its position (left) and relative fullness on the position (right) for the 35.2° angle

Za ugao 20.3° dobijaju se slični rezultati: relativna popunjenost klasterima u proseku je veća pri vrhu strme ravni nego pri dnu, ali je ravnomernija nego kod najmanjeg ugla. Pri vrhu strme ravni opet postoji jedan klaster mnogo veće površine u odnosu na ostale, ali je manja razlika u površinama klastera u odnosu na ugao 12.3° .

Na slici 5 se vidi drugačije ponašanje: relativna popunjenost klasterima više fluktuiraju nego

u prethodna dva slučaja i pri kraju strme ravni postoji nekoliko izraženih „pikova”, dok su površine klastera još više ujednačene. Klasteri najvećih površina se gomilaju oko sredine strme ravni i pri samom kraju.

Za ugao 43.2° je dobijeno da površina klastera raste od vrha ka kraju strme ravni, pri čemu su površine najvećih klastera sve manje i sve bliže vrednostima površina ostalih klastera što



Slika 6. Grafici zavisnosti površine od položaja klastera (levo) i relativne popunjenosti od položaja (desno) za ugao 43.2°

Figure 6. Graphs representing the dependence of the surface of the cluster on its position (left) and relative fullness on the position (right) for the 43.2° angle

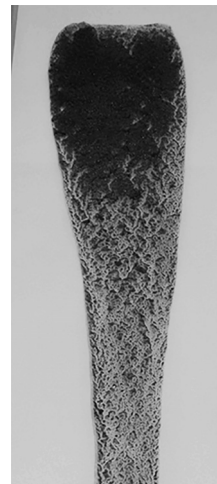
više povećavamo nagibni ugao strme ravni. Relativna popunjenost klasterima u proseku raste od vrha ka kraju strme ravni, ali retko prelazi 50% što nije slučaj za manje uglove.

Rezultati dobijeni na osnovu kvantitativne obrade slika u nekoj meri potvrđuju primećene trendove što se tiče veličine klastera. Smatramo da je razlog zašto veličina klastera za manje uglove opada, a za veće raste kako idemo od vrha ka kraju strme ravni, to što klasteri nastaju na različit način. Pri većim uglovima klasteri nastaju tako što se manji klasteri koji su na dovoljno malom rastojanju sudaraju i formiraju veće klastere dok teku niz strmu ravan, zbog čega se klasterima povećavaju međusobna rastojanja i veličina.

U preliminarnim merenjima, u kojima su smeše snimane dok teku niz strmu ravan, primećeno je da se pri manjim uglovima granule vrlo sporo kreću u odnosu na tečnost, zbog čega one ostaju većinom pri vrhu strme ravni, a tečnost nastavi da teče. Čim dovoljno tečnosti isteče, granule skoro da prestaju da se kreću, međutim, neki deo tečnosti koji ostaje „zarobljen” među granulama mora da isteče tako što napravi „kanale” među granulama koji vremenom počinju da liče na klastere. Na ovakav mehanizam formiranja ukazuje i to da je relativna popunjenost klasterima za najmanji ugao dosta visoka pri vrhu strme ravni.

Segregacija

U eksperimentu je primećeno da do segregacije dolazi samo za najmanji ugao (12.3°). Za tu vrednost ugla, granule šećera ostaju pri vrhu strme ravni dok ulje i granule kafe nastavljaju da se kreću (slika 7). Ovo se objašnjava time što se



Slika 7. Pojava segregacije šećera od ostatka smeše za ugao 12.3°

Figure 7. The segregation of sugar from the rest of the mixture for the 12.3° angle

pri manjim uglovima strme ravni granule šećera talože na dnu smeše jer je komponenta gravitacione sile koja je normalna na ravan veća, pa granule prestanu da se kreću sa ostatkom smeše. Deo granula kafe ostaje pomešan sa šećerom jer ostaju „zarobljene” među granulama šećera, tj. segregacija nije potpuna, međutim većina kafe nastavi da teče niz strmu ravan zajedno sa uljem. Pretpostavljamo da se granule kafe i šećera različito ponašaju zbog velike razlike u njihovim gustinama (tabela 1).

Da bi se preciznije odredio ugao pri kom dolazi do segregacije, posmatrano je ponašanje smeše za pet različitih uglova između dva najmanja (12.3° i 20.3°). Dobijeni rezultati su prikazani u tabeli 2.

Pojava segregacije za različite uglove	
Veličina ugla [$^\circ$]	Pojava segregacije
13.5°	Da
16°	Da
17.3°	Da
19.2°	Ne
20°	Ne

Grananje smeše

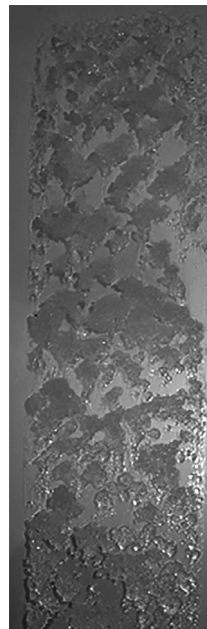
Kao što je već rečeno, u određenim smešama granularnih materijala i tečnosti je pri dovoljno velikim uglovima strme ravni grananje smeše otežano time što se vrlo gust sloj granula gomila po ivici smeše. Međutim, takvo ponašanje smeše nije primećeno u ovom ekperimentu. Primećeno je da se za male uglove – 12.3° i 20.3° smeša ne grana, dok se za veće uglove – 35.2° i 43.2° stvaraju grananja (slika 8). Ovo objašnjavamo time što, čak i ako se pri velikim uglovima ne dešava segregacija, granule šećera se ne nalaze na samom frontu smeše. Iako se granule kafe nalaze na frontu, njihova gustina je prilično mala, pa one ne utiču bitno na pojavu grananja, tj. smeša se ponaša kao samo ulje što se tiče grananja.

Da bi se što bolje ispitalo osobine smeše, posmatrane su i komponente smeše zasebno puštene niz strmu ravan – kafa sa uljem i šećer sa uljem. Primećeno je da granule šećera takođe grade klasterne (slika 9).



Slika 8. Pojava grananja smeše za ugao 43.2°

Figure 8. Fingering of the mixture for the 43.2° angle



Slika 9. Smeša šećera i ulja za ugao 43.2°

Figure 9. Mixture of sugar and oil for the 43.2° angle



Slika 10. Smeša kafe i suncokreta za uglove 12.3° , 20.3° , 35.2° , 43.2° sa leva na desno

Figure 10. The mixture of coffee and sunflower oil for the angles of 12.3° , 20.3° , 35.2° , 43.2° , from left to right respectively

Sa druge strane, kafa gradi specifičan patern (slika 10). Za tri manja ugla, mehanizam nastajanja paterna je isti kao i kod originalne smeše (za manje uglove) tj. granule kafe se natalože na ravni, a potom patern nastaje tako što ulje pravi „kanale” tamo gde prolazi dok ističe. Međutim, ovaj patern je znatno komplikovaniji od onog koji se dobija u smeši kafe, šećera i suncokretovog ulja pri manjim uglovima, zbog toga što je gustina kafe manja od gustina granula originalne smeše. Posledica ovoga je da ulje na više mesta može da prođe da bi isteklo, zbog čega u ovom paternu ima više „kanala”. Za ugao 43.2° , kafa u donjem delu strme ravni takođe gradi klaster.

Zaključak

U ovom radu je proučavan uticaj nagiba strme ravni na tok smeše dve vrste granularnog materijala i ulja koje su puštane niz ravan. Proučavane su pojave formiranja klastera, grananja smeše i segregacija različitih vrsta granula.

Pokazano je da su pri manjim uglovima klasteri veće površine pri vrhu strme ravni i da se ka dnu strme ravni smanjuju, dok je za veće uglove primećen suprotan trend – pri vrhu strme ravni su klasteri manji i gušći i ka dnu se povećavaju, i odvajaju. Primećena je i jedna vrsta segregacije, odnosno jedna komponenta smeše je za manje uglove ostajala pri gornjem delu strme ravni, odvajajući se od ostatka smeše. Takođe je posmatrano i grananje smeše, i zaključeno je da se ovakva smeša ne ponaša u skladu sa očekivanjima, to jest granule ne sprečavaju stvaranje grananja. Za dalji rad bi se mogao ispitati uticaj koncentracije smeše na pomenute pojave.

Zahvalnost. Zahvaljujemo se mentoru dr Slobodanu Vrhovcu na idejama za rad, zatim rukovodiocu, Jeleni Pajović, i saradnicima seminara fizike u IS Petnica na pomoći u realizaciji projekta, i posebno mentoru Marku Kuzmanoviću na pomoći oko obrade rezultata, mnogobrojnim sugestijama i pruženoj podršci.

Literatura

- Aranson I., Tsimring S. 2006. Patterns and collective behavior in granular media: Theoretical concepts. *Reviews of Modern Physics*, **78**: 641.
- Carlo J. P., Dodeja P. O., Fernandez J., Patel R., Timonera M., Turek R. 2001. *Fluid Flow*. Dostupno na : http://m.njit.edu/~kondic/thin_films/final_report.pdf
- Cook B. 2008. A theory for particle settling and shear-induced migration in thin-film liquid flow. *Physical Review E*, **78**: 045303
- Lee S., Mavromoustaki A., Urdaneta G., Huang K., Bertozzi A. L. 2014. Experimental investigation of bidensity slurries on an incline. *Granular Matter*, **16** (2): 269.

Zhou J., Dupuy B., Bertozzi A. L., Hosoi, A. E. 2005. Theory for shock dynamics in particle-laden thin films. *Physical Review Letters*, **94** (11): 117803.

Sara Bogojević and Petra Šešelja

The Characteristics of Flow of a Mixture of Particles Suspended in Oil Down an Incline

The aim of this paper is to determine whether cluster formation, the segregation of different types of particles, as well as the fingering of a binary mixture of particles suspended in oil flowing down an incline depend on the angle of the incline. In order to differentiate the behaviour of each type of granular material with oil individually, as compared to the original mixture, separate experiments were also conducted. The results indicate that the size distribution of the clusters formed by the particles depends on the angle of the incline, which we believe is due to the fact that the clusters are formed by different mechanisms. The segregation of one type of particle from the rest of the mixture, as well as fingering of the mixture, were observed for several values of the incline slope.

