

Ispitivanje osobina hidrauličnih skokova

Hidraulični skokovi formiraju se kada vertikalni mlaz tečnosti udari u horizontalnu podlogu na kojoj se nalazi plitak sloj tečnosti. Mlaz se radijalno širi i sloj tečnosti se stanjuje, sve dok ne dostigne određeni kritični nivo. U tačkama u kojima je dostignut kritični nivo dolazi do naglog porasta dubine i sve one zajedno čine hidraulični skok. U toku ispitivanja varirani su parametri fizičkih osobina tečnosti (gustina, viskoznost i površinski napon), poluprečnik otvora iz kojeg ističe tečnost i visina na kojoj se nalazi otvor iznad ravne horizontalne podloge u cilju određivanja uticaja ovih parametara na pojavu hidrauličnog skoka. Dobijeni hidraulični skokovi su snimani i analizirane njihove površine i oblici u zavisnosti od vremena i fizičkih osobina tečnosti. Primećeno je da površina hidrauličnih skokova opada sa porastom visine i smanjenjem poluprečnika otvora iz kojeg ističe tečnost. Sa povećanjem viskoznosti i površinskog napona tečnosti iznad određene vrednosti, formirani hidraulični skokovi postaju kružnog oblika.

Uvod

Hidraulični skok nastaje kada fluid velikom brzinom udari u sloj fluida koji se sporije kreće ili miruje. U slučaju kada vertiklani mlaz tečnosti udari u horizontalnu podlogu na kojoj se nalazi mala količina tečnosti, kao što mlaz vode udara u kuhinjsku sudoperu, mlaz se radijalno širi i sloj tečnosti se stanjuje sve dok ne dostigne određeni kritičan prečnik u kom tečnost teče brže. Na mestima gde je dostignut kritični prečnik dolazi do

naglog porasta dubine sloja koji se sada kreće sporije jer je kinetička energija mlaza fluida pretvorena u potencijalnu energiju fluida (Ellegaard *et al.* 1998).

Na slici 1 prikazani su tipovi hidrauličnih skokova. Prvi tip skoka je standardni (kružni) hidraulični skok kod kog se tečnost širi radijalno po horizontalnoj površini. Drugi tip skoka karakteriše se odvajanjem slojeva tečnosti koja se izdigne nakon pojave skoka. Kako se visina tečnosti povećava na horizontalnoj podlozi usled stalnog isticanja tečnosti, dolazi do sve većeg odvajanja slojeva, pa drugi tip polako prelazi u treći tip, koji se još naziva i „dupli hidraulični skok” (Bush *et al.* 2006).

Pri većim protocima fluida oblik hidrauličnog skoka postaje nepravilan, drugačiji od kružnog i zavisi od vremena. Dimenzije i oblik skoka zavise od fizičkih osobina fluida (gustine, viskoznosti i površinskog napona), kao i od početne visine tečnosti na podlozi, poluprečnika otvora cevi iz koje ističe fluid, protoka fluida kroz cev i visine na kojoj se nalazi otvor cevi iznad podloge.

Između slojeva tečnosti deluju tangencijalne sile koje se zovu viskozne sile ili sile unutrašnjeg trenja. Viskoznost ili unutrašnje trenje je osobina tečnosti da pružaju otpor međusobnom kretanju slojeva tečnosti i kretanju tela kroz njih. Površinski napon je osobina tečnosti uzrokovana privlačenjem molekula tečnosti međumolekulskim silama (Čaluković 2007).

Uticaj poluprečnika otvora iz kog ističe tečnost ilustrovan je slici 2. Ako ista tečnost ističe sa iste visine na horizontalnu podlogu, ali iz otvora

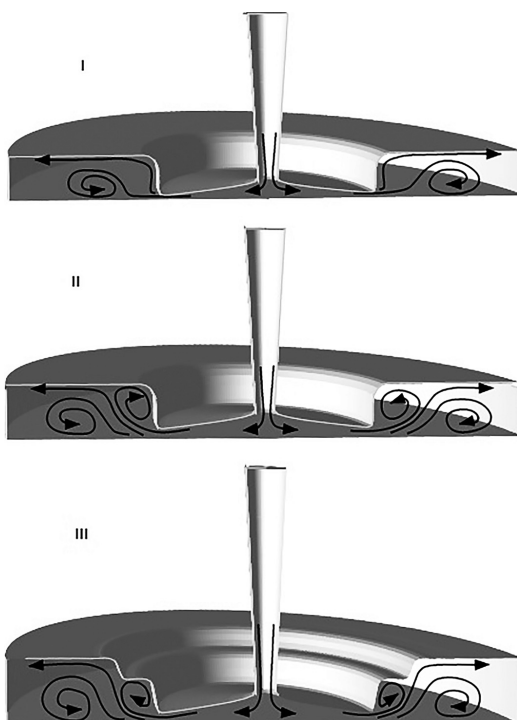
Marija Milutinović (1996), Loznica, Slobodana Penezića 4, učenica 2. razreda Gimnazije „Vuk Karadžić” u Loznici

Jovan Markov (1996), Beograd, Mirijevski venac 22/45, učenik 2. razreda Matematičke gimnazije u Beogradu

MENTORI:

Marija Janković, Fizički fakultet Univerziteta u Beogradu

Vladan Pavlović, Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Nišu



Slika 1. Šematski prikaz promene hidrauličnog skoka sa porastom visine tečnosti na podlozi (Bush *et al.* 2006)

Figure 1. Schematic representation of the change of the hydraulic jump with the increase in height of the liquid surface (Bush *et al.* 2006)

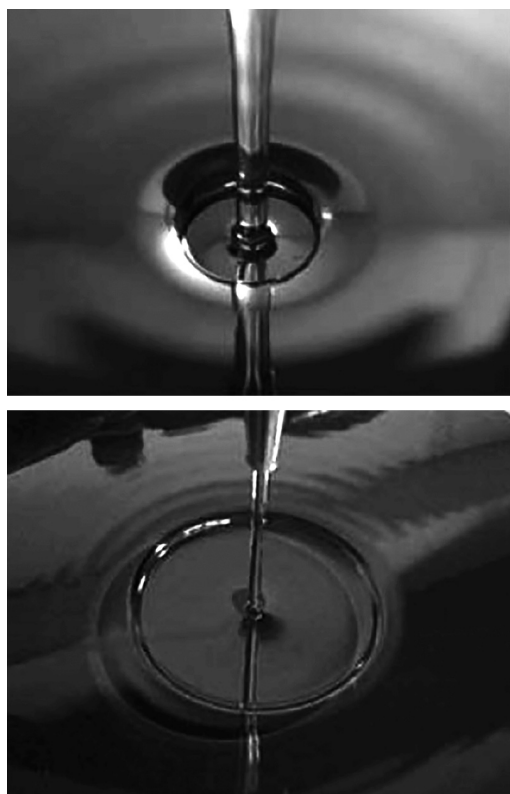
različitih poluprečnika, površina hidrauličnog skoka je manja za veći poluprečnik otvora u trenutku kada je ista visina tečnosti na staklu (Bush *et al.* 2003).

Cilj ovog rada je ispitivanje uticaja površinskog napona i viskoznosti različitih tečnosti, kao i visine i poluprečnika otvora iz kojeg tečnost ističe na površinu i oblik formiranih hidrauličnih skokova i njihovu promenu tokom vremena.

Aparatura i metod

Ispitana je zavisnost površine i oblika hidrauličnih skokova u zavisnosti od vremena i fizičkih osobina tečnosti. Tokom ispitivanja varirani su sledeći parametri:

1. pet vrsta fluida:
 - a) 100% antifriz (etilen-glikol)

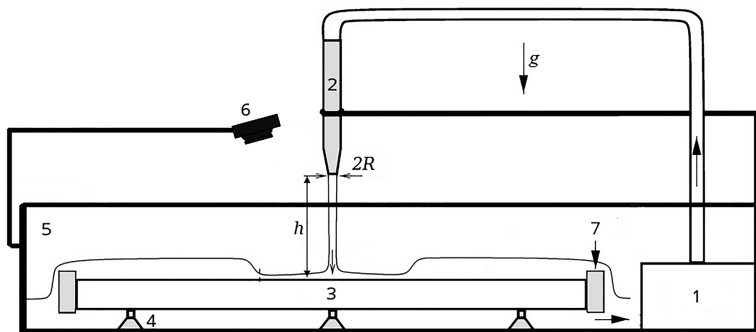


Slika 2. Prikaz povećanja površine hidrauličnog skoka smanjenjem poluprečnika otvora iz kog ističe tečnost (Bush *et al.* 2003)

Figure 2. Representation of the areal increase of the hydraulic jump by reducing the radius of the nozzle (Bush *et al.* 2003)

- b) rastvori saharoze i vode: 30, 40, 50, 60%
2. pet različitih otvora na dizni: $R = 1, 2, 3, 4$ i 5 mm
3. pet visina dizne iznad stakla: $h = 1, 2, 3, 4, 5$ cm

Aparatura korišćena u eksperimentu prikazana je na slici 3. Nosač stakla sa tri nožice sa šrafova pomoću kojih se niveliše staklo, smešten je u kadicu. Kružno staklo (prečnika 36 cm) oko koga je postavljena granica od kant trake (traka od iverice koja se koristi u industriji nameštaja, visine 1.8 cm) i milimetarski papir sa donje strane, horizontalno je postavljeno na držač. Iznad njega je postavljen stalak koji nosi crevo povezano sa pumpom na jednoj strani i diznom na



Slika 3. Šema aparature:
1 – pumpa, 2 – dizna,
3 – staklo, 4 – nosač stakla,
5 – kadica, 6 – fotoaparat,
7 – graničnik oko stakla.

Figure 3. Scheme of the apparatus: 1 – pump, 2 – nozzle, 3 – glass, 4 – glass holder, 5 – tub, 6 – camera, 7 - border.

drugoj strani. Pomoću ovog stalka omogućena je promena visine dizne iznad stakla. Visina otvora dizne iznad stakla merena je lenjirom. Dizne su pri kraju sužene kako bi se izbegla pojava turbulencije i obezbedio laminaran tok tečnosti. Pre svakog merenja staklo je nivelisano (kako bi se obezbedio uslov posmatranja hidrauličnog skoka koji se javlja na potpuno ravnoj horizontalnoj površini). Pumpa protoka $Q = 120 \text{ mL/s}$ postavljena je unutar kadice u koju je nasuta tečnost. Odmah nakon puštanja pumpe u rad, na staklu se pojavljuje hidraulični skok, a istovremeno se tečnost sa stakla sliva u kadicu, čime se obezbeđuje stalna cirkulacija tečnosti. Fotoaparat sa stalkom postavljen je ispred kadice pod određenim uglom pogodnim za snimanje, tako da snima promene hidrauličnih skokova od trenutka njihovog nastajanja do trenutka zatvaranja.

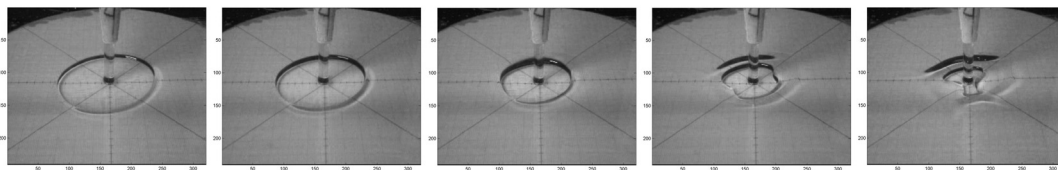
Za sve vrste tečnosti, kao i za svaku pojedinačnu diznu, računat je protok tečnosti (tabela 1). Fizičke osobine tečnosti određene su eksperimentalnim putem, i dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 2. Izmerena je određena zapremina i masa svakog rastvora i tako je određena gustina.

Koeficijent površinskog napona određen je metodom otkidanja prstena (Stančić 1999). Koeficijent viskoznosti određen je viskozimetrom. Merenja su vršena na temperaturi $(22.9 \pm 0.1)^\circ\text{C}$.

Analiza oblika hidrauličnih skokova

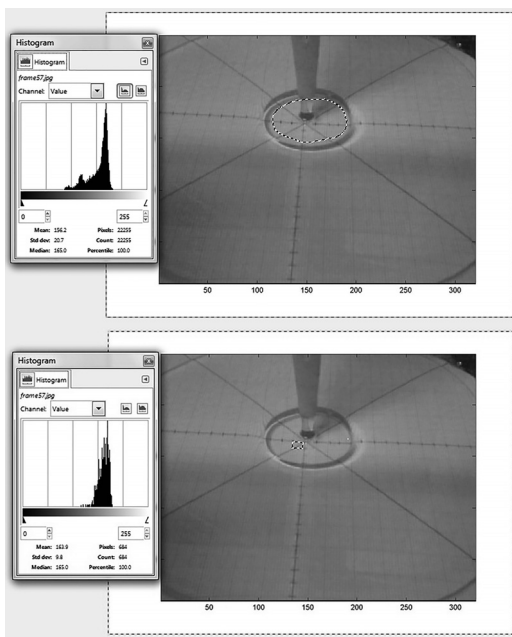
Za analizu snimaka hidrauličnih skokova u Matlabu je urađena procedura koja iz svakog snimka izdvaja određen broj frejmova u vremenskom razmaku 2s (slika 4). Potom je sa svakog frejma u programu GIMP analizirana površina oblika. Obeležene su ivice formiranog hidrauličnog skoka. Površina unutar ivice skoka je selektovana i očitana je broj piksela te površine i obojena u crno, a okolni prostor u belu boju. Zatim je izračunata površina skoka poređenjem broja piksela oivičene oblasti i kontrolnog kvadrata, sa istog frejma, koji predstavlja površinu na milimetarskom papiru dimenzija $5 \times 5 \text{ mm}$ (slika 5).

Jedna od veličina kojom se karakteriše neka figura jeste faktor oblika. To je bezdimenzioni broj koji ne zavisi od veličine same figure, već i



Slika 4. Prikaz uzastopno izdvojenih frejmova

Figure 4. A row of selected frames



Slika 5. Metod za izračunavanje površine dobijenih hidrauličnih skokova

Figure 5. The method for calculating the surface of the hydraulic jump's shape

od oblika njene granice, odnosno obima figure i njene površine. Za kvantitativno opisivanje oblika hidrauličnog skoka korišćen je faktor oblika, računat na sledeći način:

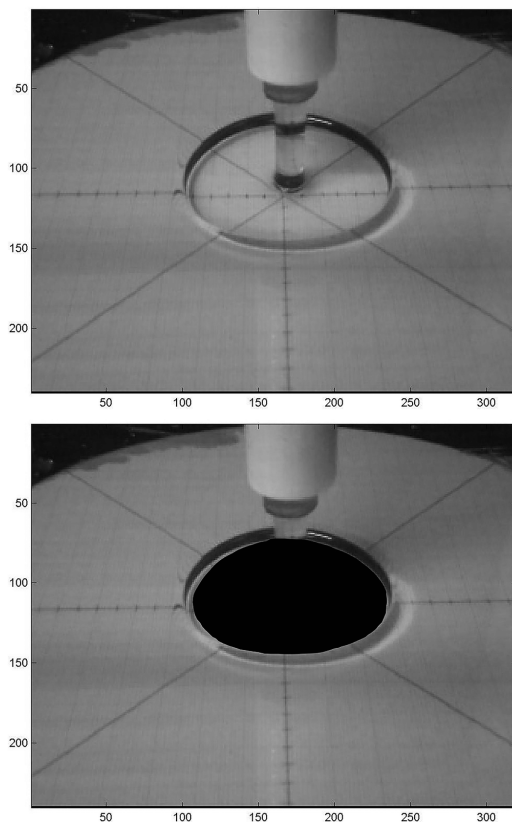
$$\sigma = \frac{O^2}{4\pi P} \quad (1)$$

gdje je O obim, a P površina hidrauličnog skoka

U Matlab-u je napisan program za prebrojavanje ivičnih piksela prethodno obeleženog hidrauličnog skoka (piksela koji određuju granicu) na frejmu, kao i broj piksela koji se nalaze unutar te granice i određuje njegovu površinu. Zatim je na osnovu relacije (1) računat faktor oblika (slika 6)

Grešku pri određivanju granice oblika hidrauličnog skoka računali smo tako što smo dužinu ivice oblika pomnožili sa 4 piksela, smatrajući da opseg te greške predstavlja „pojas” u kom se nalazi granica formiranog hidrauličnog skoka.

Tokom izvođenja eksperimenta, pre svakog snimanja bilo je potrebno uključiti pumpu određeno vreme kako bi se dobio homogeni rastvor.



Slika 6. Metod za izračunavanje faktora oblika hidrauličnih skokova

Figure 6. The method for calculating the shape factor of the hydraulic jump

Naime, kada su rastvori šećera stajali u kadi duže vreme, šećer se taložio što je uslovalo nehomogenost smeše. Takođe, mešanjem rastvora masenih udela većih od 60%, dobijana je heterogena smeša, stoga nismo ispitivali pojave hidrauličnih skokova sa ovim rastvorima. U toku eksperimenta i pored upotrebe reduktora protoka, nije postignut konstantan protok tečnosti kroz otvore na dizni prilikom korišćenja različitih tečnosti.

Rezultati i diskusija

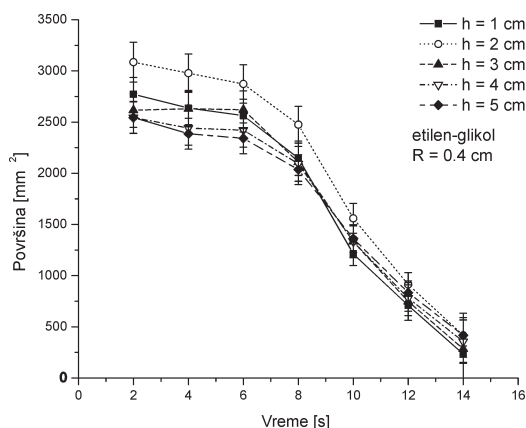
Protok i fizičke osobine tečnosti dati su u tabelama 1 i 2.

Tabela 1. Protok tečnosti Q [mL/s]

Poluprečnik otvora dizne [mm]	Tečnost				
	100% antifriz	30% rastvor šećera	40% rastvor šećera	50% rastvor šećera	60% rastvor šećera
2	19.176	23.865	23.020	19.256	16.453
4	36.730	52.873	46.543	36.879	28.685
6	43.916	66.582	64.560	46.011	39.325
8	53.627	85.060	81.265	65.581	45.310
10	55.237	95.752	90.496	68.770	46.392

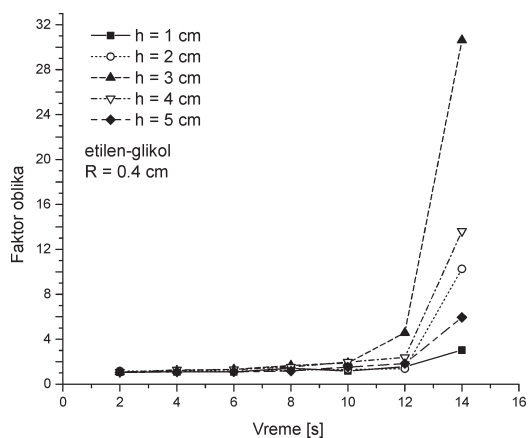
Tabela 2. Fizičke osobine tečnosti

Tečnost	Gustina [g/cm ³]	Koeficijent viskoznosti [mPas]	Koeficijent površinskog napona [N/m]
etilen-glikol	1.10±0.03	22.4±0.1	0.059±0.017
30% rastvor šećera	1.11±0.04	8.9±0.1	0.048±0.013
40% rastvor šećera	1.17±0.02	12.7±0.1	0.060±0.017
50% rastvor šećera	1.20±0.04	23.1±0.1	0.076±0.012
60% rastvor šećera	1.25±0.06	51.7±0.1	0.103±0.018



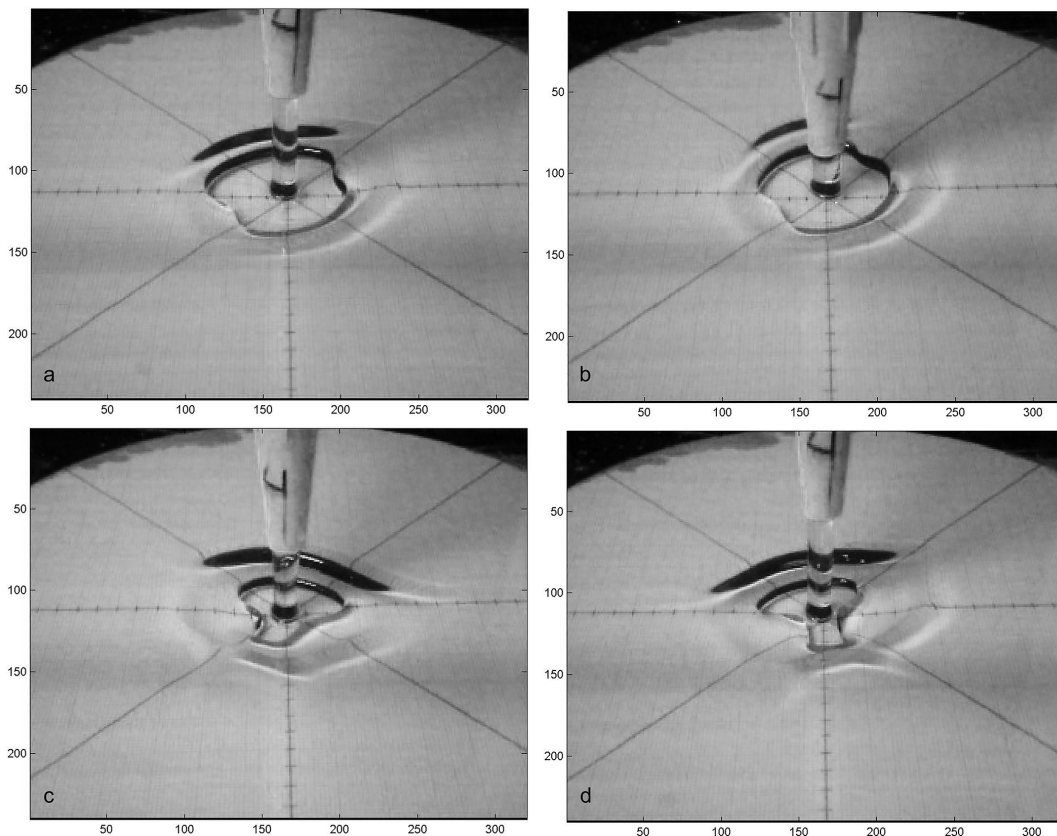
Slika 7. Zavisnost površine hidrauličnih skokova za etilen-glikol i otvor poluprečnika R = 0.4 cm

Figure 7. The dependence of the surface of the hydraulic jump to time (liquid: ethylene glycol, the radius of hole R = 0.4 cm)



Slika8. Zavisnost faktora oblika hidrauličnih skokova za etilen-glikol i otvor poluprečnika R = 0.4 cm

Slika 8. The dependence of the shape factor of the hydraulic jump to time (liquid: ethylene glycol, the radius of hole R = 0.4 cm)



Slika 9. Hidraulični skokovi nastali korišćenjem etilen-glikola: a) $R = 0.4$ cm, $h = 3$ cm, $t = 12$ s; b) $R = 0.4$ cm, $h = 1$ cm, $t = 30$ s; c) $R = 0.4$ cm, $h = 2$ cm, $t = 14$ s; d) $R = 0.4$ cm, $h = 3$ cm, $t = 14$ s.

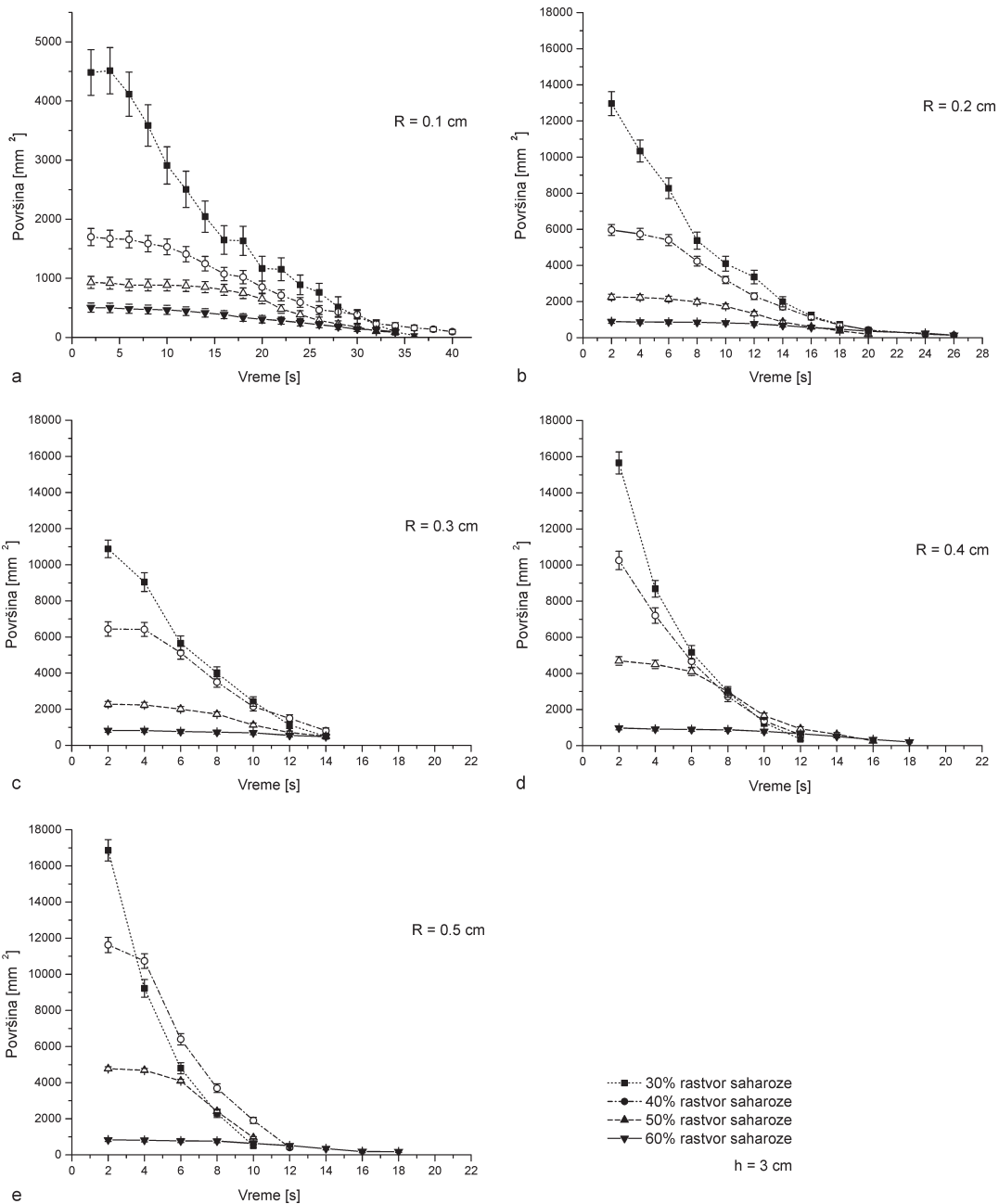
Figure 9. Hydraulic jumps created using ethylene glycol: a) $R = 0.4$ cm, $h = 3$ cm, $t = 12$ s; b) $R = 0.4$ cm, $h = 1$ cm, $t = 30$ s; c) $R = 0.4$ cm, $h = 2$ cm, $t = 14$ s; d) $R = 0.4$ cm, $h = 3$ cm, $t = 14$ s.

Promena površina i faktora oblika hidrauličnih tokom vremena za različite visine dizne iznad stakla data je na graficima (slike 7 i 8).

Prilikom analize površina i faktora oblika hidrauličnih skokova na različitim visinama otvora dizne od stakla (slika 9), primećeno je da površina opada sa porastom visine dok faktor oblika neznatno zavisi od visine otvora iz kog ističe tečnosti iznad stakla (slika 7 i slika 8). Iz tog razloga smo dalje posmatrali zavisnost površine i faktora oblika od početka isticanja tečnosti do zatvaranja skoka prilikom korišćenja različitih tečnosti i različitih otvora dizni na fiksiranoj visini od $h = 3$ cm.

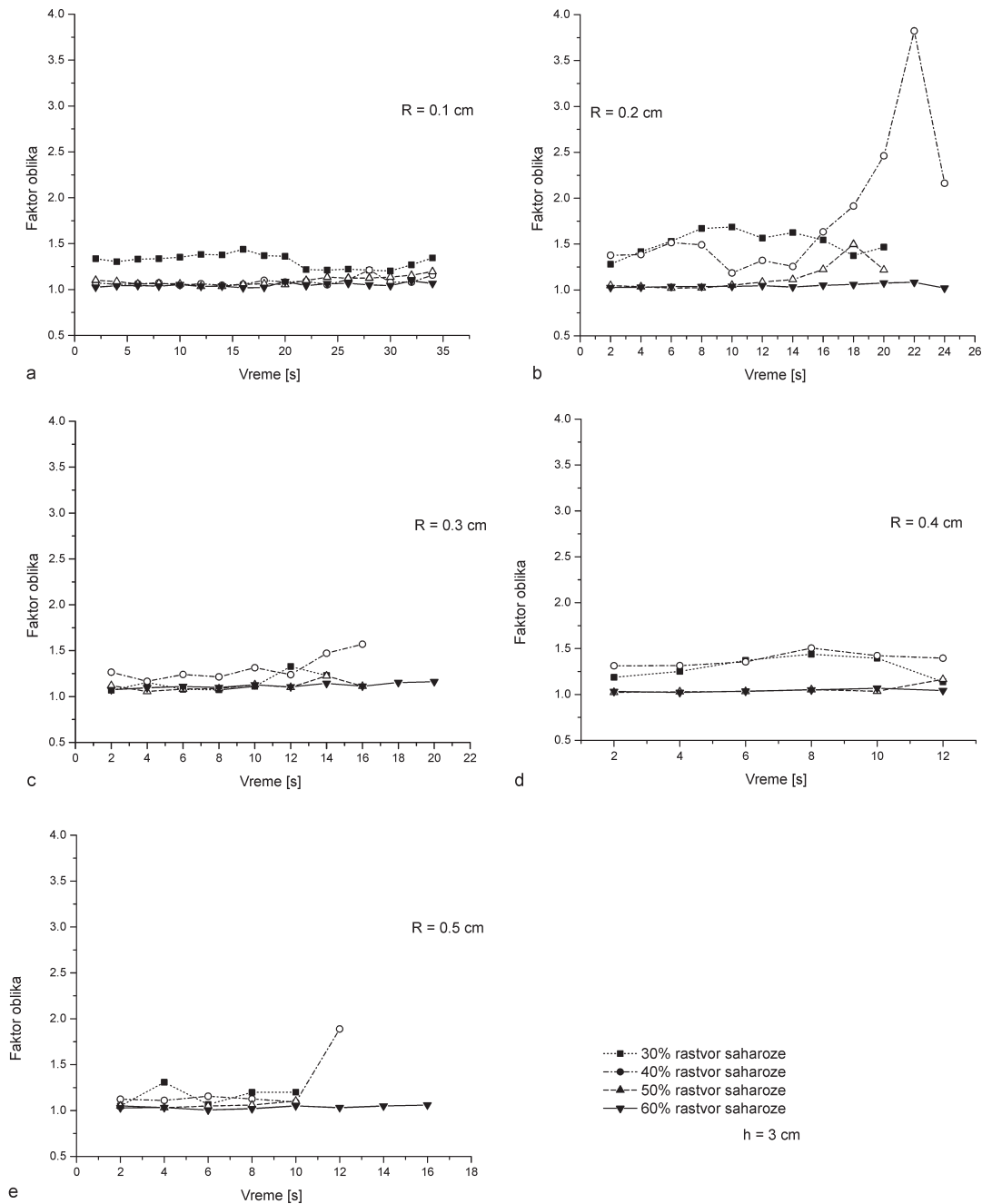
Na graficima zavisnosti površine od vremena (slika 10) zapaža se da i površina hidrauličnih skokova opada u toku vremena tj. od nastanka skoka do njegovog zatvaranja. Primećeno je da površina skokova najveća kod 30% rastvora saharoze i opada sa porastom masenog udela saharoze u rastvoru. Upotrebom 60% rastvora saharoze površine oblika su znatno manje i menjaju se sporo kroz vreme.

Hidraulični skokovi koji nastaju kada tečnost ističe iz otvora poluprečnika 0.1 cm su vremenski najduži. Površine tih oblika su manje od površina oblika nastalih prilikom korišćenja ostalih dizni i menjaju se relativno sporo kroz vreme (slika 10a).



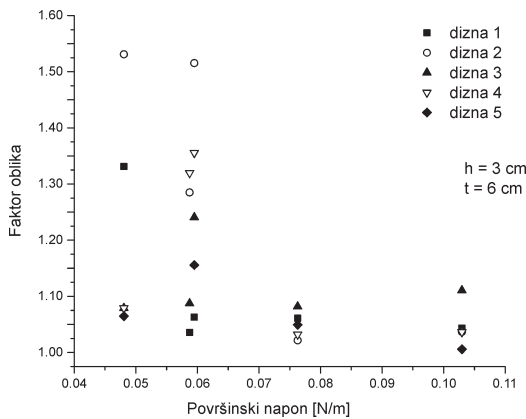
Slika 10. Zavisnost površine hidrauličnih skokova od vremena za otvore poluprečnika $R = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ i 0.5 cm na visini otvora $h = 3$ cm iznad stakla

Figure 10. The dependence of the surface of the hydraulic jump to time (radius of hole $R = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5 cm, height $h = 3$ cm)



Slika 11. Zavisnost faktora oblika hidrauličnih skokova od vremena za otvore poluprečnika $R = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ i 0.5 cm na visini otvora $h = 3$ cm iznad stakla

Figure 11. The dependence of the shape factor of the hydraulic jump to time (radius of hole $R = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5 cm, height $h = 3$ cm)



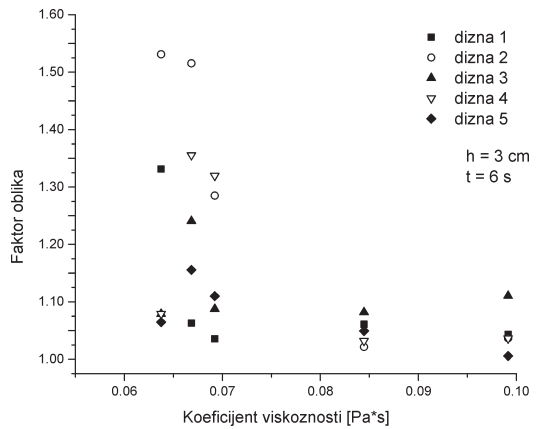
Slika 12. Zavisnost faktora oblika od površinskog napona nakon $t = 6$ s od početka isticanja tečnosti na visini otvora $h = 3$ cm iznad stakla

Figure 12. The dependence of the shape factor of the hydraulic jump to surface tension ($t = 6$ s, $h = 3$ cm)

Sa povećanjem poluprečnika otvora dizne smanjuje se vreme trajanja hidrauličnih skokova.

Kod 30% rastvora faktor oblika se kreće u rasponu od 1.5-1.7 i pri tome se javljaju hidraulični skokovi oblika elipse, međutim na krajevima ovih oblika javljaju se turbulencije u toku kojih se molekuli tečnosti „rasipaju” (slika 11), što je posledica malog koeficijenta površinskog napona 30% rastvora saharoze. Kod 60% rastvora saharoze, faktor oblika se kreće u rasponu od 1.00 do 1.18, odnosno hidraulični skokovi u svakom trenutku imaju približno kružan oblik (slika 11). Ovo je posledica znatnog većeg koeficijenta površinskog napona 60% rastvora šećera koji uzrokuje da se molekuli tečnosti drže na okupu.

Opseg faktora oblika hidrauličnih skokova posmatran u jednom vremenskom trenutku je bio najveći za 30% i 40% rastvor saharoze i etilen-glikola. Koeficijent viskoznosti ovih tečnosti kreće se u opsegu (8.9-22.4) mPa·s (slika 13), a koeficijent površinskog napona u opsegu (0.048-0.060) N/m. Sa povećanjem koeficijenta viskoznosti fluida iznad vrednosti (23.1 ± 0.1) mPa·s (slika 13) i koeficijenta površinskog napona iznad vrednosti (0.076 ± 0.012) N/m (slika 12),



Slika 13. Zavisnost faktora oblika od koeficijenta viskoznosti nakon $t = 6$ s od početka isticanja tečnosti na visini otvora $h = 3$ cm iznad stakla

Figure 13. The dependence of the shape factor of the hydraulic jump to viscosity ($t = 6$ s, $h = 3$ cm)

faktor oblika se kreće u opsegu (1.00-1.11), odnosno hidraulični skokovi sve više imaju oblik kruga.

Zaključak

U procesu istraživanja uspešno je demonstrirana pojava hidrauličnih skokova koji nastaju kada vertikalni mlaz fluida udari velikom brzinom u horizontalnu podlogu kada se na njoj nalazi mala količina fluida. Primećeno je da površina opada sa porastom visine dok faktor oblika neznatno zavisi od visine otvora iz kog ističe tečnosti iznad stakla. Površina hidrauličnih skokova opada sa porastom masenog udela saharoze u rastvoru. Hidraulični skokovi koji nastaju kada tečnost ističe iz otvora poluprečnika 0.1cm su vremenski najduži. Površine tih oblika su manje od površina oblika nastalih prilikom korišćenja ostalih dizni i menjaju se relativno sporo kroz vreme. Raspon u kom se kreće površina i faktor oblika hidrauličnih skokova postaje uži sa porastom masenog udela saharoze u rastvoru što je posledica povećanja koeficijenta površinskog napona fluida koji uzrokuje da se molekuli tečnosti „čvršće” drže na okupu te hidraulični sko-

kovi postaju kružnog oblika. Prilikom upotrebe etilen-glikola primećene su pojave hidrauličnih skokova oblika trougla, mašnice i jedan oblik sa tri oštra ugla i 5 strana. Za 40% rastvora došlo je do pojave hidrauličnih skokova oblika elipse i oblika nalik na deteline, dok se korišćenjem 50% rastvora stvaraju nepravilni poligonalni oblici. Hidraulični skokovi su kružnog oblika kod 60% rastvora saharoze.

Zahvalnost. Zahvaljujemo se svojim mentorima Mariji Janković, studentu Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu i Vladanu Pavloviću, istraživaču pripravniku Prirodno-Matematičkog fakulteta Univerziteta u Nišu, kao i Jeleni Pajović, rukovodiocu seminarara fizike i Stevanu Radanoviću i Miroslavu Bogdanoviću, saradnicima seminarara fizike, na korisnim savetima i pruženoj podršci i pomoći u toku realizacije ovog rada. Takođe se zahvaljujemo prof. Đorđu Spasojeviću i Laboratoriji za fizičku mehaniku i termofiziku Fizičkog fakulteta Univerziteta u Beogradu, Petru Ninkoviću na pomoći pri izradi aparature i Sunčici i Vladanu Milutinoviću na pomoći prilikom realizacije eksperimenta, kao i Kseniji Simonović za predloženu ideju projekta.

Literatura

Bush J. W. M., Aristoff J. M. 2003. The influence of surface tension on the circular hydraulic jump. *Journal of Fluid Mechanics*, **489**: 229.

Bush J. W. M., Aristoff J. M., Hosoi A. E. 2006. An experimental investigation of the stability of the circular hydraulic jump. *Journal of Fluid Mechanics*, **558**: 33.

Craik A. D. D., Latham R. C., Fawcett M. J., Gribbon P. W. F. 1981. The circular hydraulic jump. *Journal of Fluid Mechanics*, **112**: 347.

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

Ellegaard C., Hansen A. E., Haaning A., Hansen K., Marcussen A., Bohr T., Hansen J.

L., Watanabe Sh. 1998. Creating corners in kitchen sinks. *Nature*, **392**: 767.

Liu X., Lienhard J. 1993. The hydraulic jump in circular jet impingement and in other thin liquid films. *Experiments in Fluids*, **15**: 108.

Stančić N. 1999. *Priručnik iz fizike za treći razred gimnazije*. Beograd: Zavod za udžbenike i nastavna sredstva

Marija Milutinović and Jovan Markov

Examination of Properties of Hydraulic Jumps

In this project we observed some physical properties of hydraulic jumps. We analyzed the area of hydraulic jumps and their shape factor depending on the time and the physical properties of the liquid.

When a vertical jet of liquid from a nozzle hits a flat surface, as in tap water striking the kitchen sink, a discontinuity appears in a ring created by the flow. Fluid is expelled radially, and the layer generally thins until reaching a critical radius at which the layer depth increases abruptly (Ellegaard *et al.* 1998).

Varying the nozzle size, distance between nozzle and horizontal flat surface, test fluid and flux of this liquid allowed us to explore a new regime marked by structures which have different shapes. We used five liquids and we observed the occurrence of hydraulic jumps form that included circular, oval, polygonal, bowtie, and clover-shaped jumps.

It was noticed that the area of hydraulic jumps decreases with increasing height and decreasing radius of nozzle, with the exception of the 60% sucrose solution, and shape factor is not greatly dependent on the distance between the nozzle and the flat horizontal surface. It was concluded that with increasing viscosity and surface tension above a certain value, hydraulic jumps become more circular. 