

# Laboratorijska simulacija talasa fluidizovane jalovine

**Dejan Komatina, Miodrag Jovanović**

Građevinski fakultet, Beograd

**Rezime.** U radu su prikazani rezultati eksperimentalnog ispitivanja neustaljenog kretanja visokokoncentrovanih mešavina vode i gline, koje su po svojim reološkim svojstvima bliske fluidizovanim jalovinama. U laboratorijskom kanalu su simulirani talasi, slični onim koji bi nastali u slučaju kratkotrajnog (skoro trenutnog) proloma brana od jalovine. Rezultati eksperimenata su dati u vidu bezdimenzionih dijagrama vremenske i prostorne zavisnosti hidrauličkih parametara (dubine, brzine, oblika i dometa čela talasa) od početne dubine u rezervoaru, nagiba dna i koncentracije čvrste faze. Ovi podaci čine sastavni deo baze eksperimentalnih podataka, koja se na Građevinskom fakultetu u Beogradu razvija za potrebe kalibracije i provere numeričkih modela za predviđanje hidrauličkih posledica rušenja brana od jalovine.

**Ključne reči:** jalovišta, guste mešavine, prolom brane, neustaljeno tečenje.

## 1. Uvod

Počev od 1990. godine, na Građevinskom fakultetu u Beogradu se obavljaju teorijska i eksperimentalna istraživanja otvorenih tokova gustih mešavina vode i gline, kao i mešavina vode i jalovine sa deponije "Veliki Krivelj". Ova istraživanja su neophodna da bi se u hidrotehničkoj praksi mogli rešavati problemi prognoze poplavnih talasa od raskvašene jalovine, koji bi se javili kao posledica havarija na jalovištima. S obzirom na složenost fenomena, istraživanja su dugoročnog karaktera, a obavljaju se paralelno u laboratoriji i na terenu. U ovom radu su prikazani neki od rezultata eksperimentalnog rada.

## 2. Eksperimentalna ispitivanja

U eksperimentima su kao radni fluid korišćene mešavine vode i kaolinske gline, koje su po reološkim svojstvima slične fluidizovanim jalovinama [1], [4]. Prethodno je određen njihov hemijski i granulometrijski sastav, kao i osnovni reološki parametri: viskoznost i granična smičuća nosivost u funkciji koncentracije čvrste faze [2], [3].

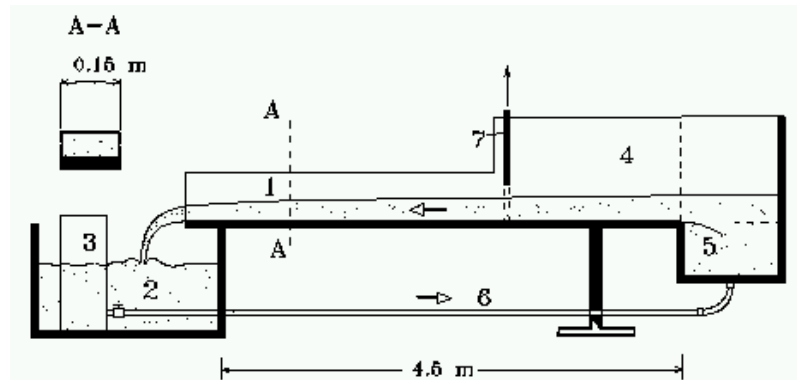
Eksperimenti su izvedeni u laboratorijskom kanalu dužine 4.5 m, pravougaonog poprečnog preseka širine 15 cm, sa mogućnošću promene nagiba dna (Slika 1). U ispitivanju ustaljenog režima tečenja<sup>1</sup>, koristi se muljna pumpa. Za potrebe eksperimenata neustaljenog tečenja, na uzvodnom kraju kanala postavljen je rezervoar sa ustavom. Podizanjem ustave formira se talas, čije se karakteristike ispituju u kanalu nizvodno od rezervoara. Rezultati su dobijeni obradom digitalizovanih video snimaka.

Do sada je izvedeno 69 eksperimenata, pri čemu su varirani: početna dubina u rezervoaru (u opsegu 10-30 cm), nagib dna kanala (0-0.1%) i zapreminska koncentracija čvrste faze (0-36.1%).

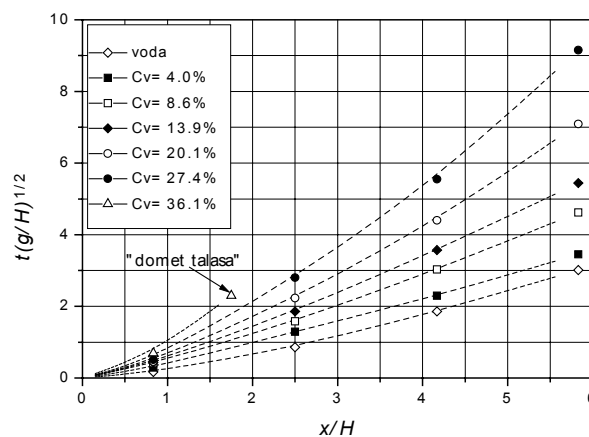
---

<sup>1</sup> Eksperimenti ustaljenog tečenja (o kojima se ne govori u ovom radu) obavljaju se sa ciljem utvrđivanja efekata razmere, pri čemu je laboratorijski kanal model odvodnog kanala jalovišta "Veliki Krivelj" u razmeri 1:6.

Primeru radi, na Slici 2 je prikazan uticaj koncentracije na brzinu talasa pri nagibu dna kanala od 0.1%. Evidentno je smanjenje brzine sa porastom koncentracije. Pri ekstremno visokoj koncentraciji od 36.1%, talas mešavine ne doseže kraj kanala, već se zaustavlja na rastojanju od  $x = x_o = 1.75 \cdot H$ . Ova dužina predstavlja "domet talasa".



Slika 1. Laboratorijska instalacija: (1) kanal; (2) nizvodni rezervoar; (3) muljna pumpa; (4) uzvodni rezervoar; (5) deflektor; (6) gumena cev; (7) ustava.



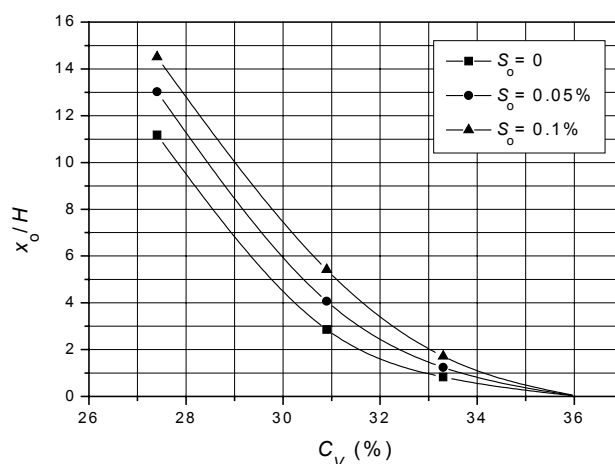
Slika 2. Uticaj koncentracije čvrste faze na brzinu prostiranja talasa [3]. Oznake:  $t$  - vreme;  $H$  - početna dubina mešavine u rezervoaru,  $x$  - odstojanje čela talasa od ustave;  $C_v$  - zapreminska koncentracija čvrste faze;  $g$  - gravitaciono ubrzanje.

U cilju poređenja brzine talasa mešavine i vode, u Tabeli 1 je prikazan odnos  $x_m/x_w$  (indeksi  $m$  i  $w$  označavaju mešavinu i vodu). Može se videti da vrednosti ovog odnosa generalno opadaju sa porastom koncentracije. Ovaj trend je izraženiji što je veći nagib dna kanala i što je veća početna dubina u rezervoaru.

Tabela 1. Poređenje brzine prostiranja talasa mešavine i "čiste" vode.

Nagib dna (%)	Dubina u rezerv. (cm)	Zapreminska koncentracija čvrste faze (%)					
		4.0	8.6	13.9	20.1	27.4	36.1
0.00	10	0.94	0.89	0.72	0.61	0.44	-
	20	0.76	0.72	0.60	0.48	0.34	-
	30	0.74	0.70	0.57	0.46	0.37	0.26
0.05	10	0.83	0.79	0.54	0.50	0.38	-
	20	0.81	0.63	0.52	0.42	0.31	-
	30	0.74	0.57	0.49	0.39	0.33	0.24
0.10	10	0.75	0.71	0.50	0.46	0.36	-
	20	0.70	0.57	0.51	0.45	0.30	-
	30	0.69	0.56	0.50	0.45	0.40	0.28

Pri visokoj koncentraciji od 36.1% i početnoj dubini u rezervoaru  $H = 10$  i  $20$  cm, ne dolazi do pokretanja mešavine iz rezervoara (prazna polja u Tabeli 1). Pri nižim koncentracijama dobijaju se različite vrednosti dometa  $x_0$ , pri čemu ovaj raste sa opadanjem koncentracije (Slika 3).



Slika 3. Domet talasa u funkciji od nagiba dna kanala i koncentracije [3].

Oznake:  $S_0$  - nagib dna kanala;  $x_0$  - domet talasa (odstojanje tačke zaustavljanja talasa od ustave).

Uticaj koncentracije na dubinu ( $h$ ) prikazan je hronološki na Slici 4 (a)-(c), pri nagibu dna od 0.1%. Može se uočiti da je čelo talasa strmije, što je koncentracija veća.

Na Slici 5 (a)-(b), ilustracije radi su prikazani karakteristični bezdimenzioni nivogrami u dva poprečna profila nizvodno od ustave. U Tabeli 2 dat je odnos dubine mešavine i "čiste" vode ( $h_m/h_w$ ), koji pokazuje da se pri istim uslovima, kod mešavina uvek javljaju veće dubine nego kod vode. Vidi se da dubina raste sa koncentracijom, a opada tokom vremena. Vrednost odnosa  $h_m/h_w$  generalno raste sa odstojanjem (Tabela 3).

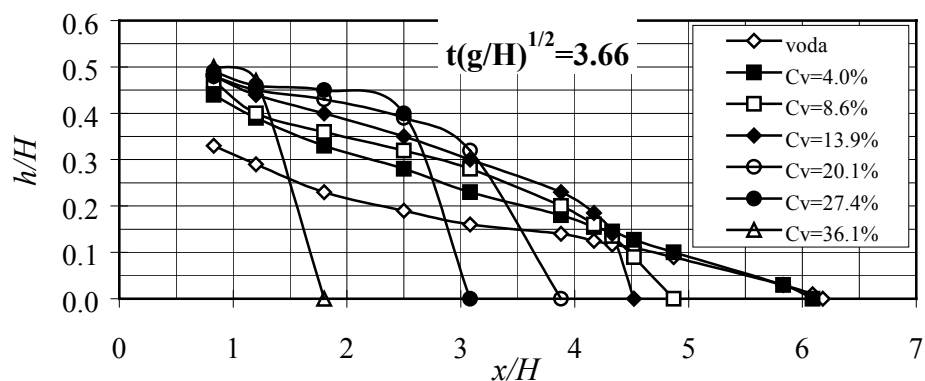
Tabela 2. Odnos dubine talasa mešavine i "čiste" vode za  $x/H = 2.5$  i  $S_o = 0.1\%$ .

Vreme $t\sqrt{g/H}$	Zapreminska koncentracija čvrste faze (%)					
	4.0	8.6	13.9	20.1	27.4	36.1
2.50	1.47	1.80	1.87	1.60	-	-
3.66	1.49	1.67	1.74	1.97	2.00	-
4.80	1.20	1.36	1.44	1.60	1.68	-
5.95	1.07	1.21	1.27	1.39	1.50	-

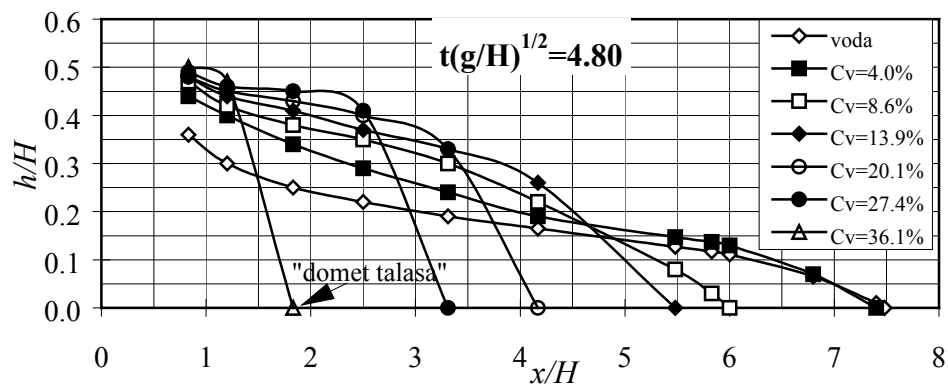
Tabela 3. Odnos dubine talasa mešavine i vode za  $t\sqrt{g/H} = 5.95$  i  $S_o = 0.1\%$ .

Odstojanje $x/H$	Zapreminska koncentracija čvrste faze (%)					
	4.0	8.6	13.9	20.1	27.4	36.1
0.83	1.16	1.24	1.26	1.26	1.29	1.32
2.50	1.11	1.26	1.33	1.44	1.56	-
4.17	1.11	1.26	1.37	1.42	-	-
5.83	1.07	1.13	1.20	-	-	-

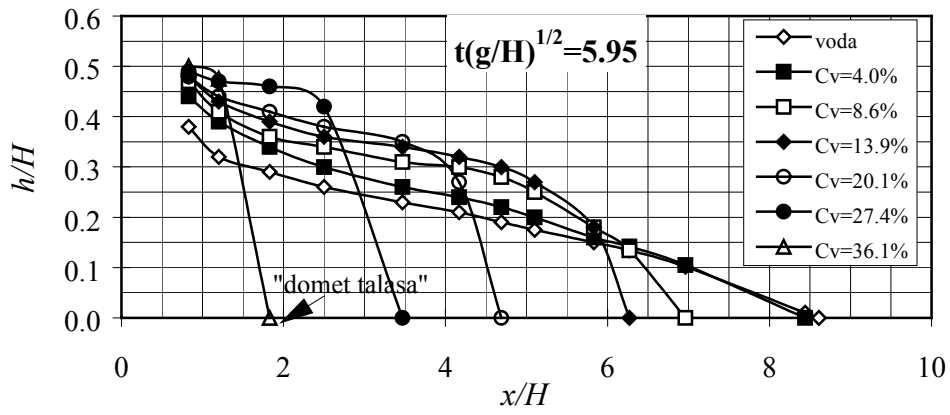
(a)



(b)

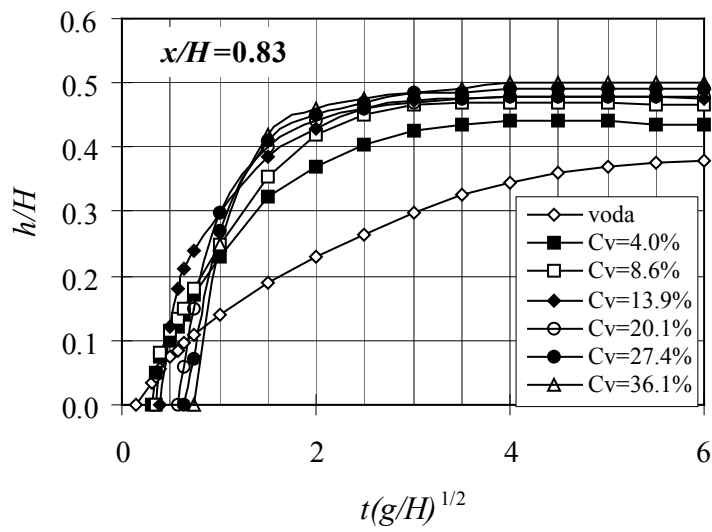


(c)

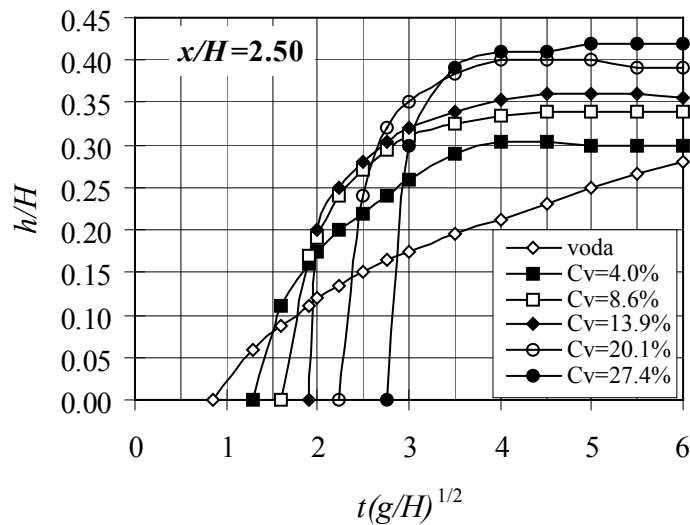


Slika 4. Uticaj koncentracije na dubinu [3].

(a)



(b)



Slika 5. Hidrogrami u izabranim poprečnim preseccima [3].

### 3. Zaključci

Na osnovu prikazanih rezultata, mogu se izvući sledeći zaključci:

1. Brzina prostiranja talasa gustih mešavina kao što je fluidizovana jalovina, uvek je manja od brzine odgovarajućeg vodenog talasa. Ova brzina zavisi od koncentracije čvrste faze, odnosno reoloških svojstava mešavine, od početne dubine u rezervoaru i nagiba dna kanala. Brzina prostiranja talasa ispitanih mešavina se smanjuje i do četiri puta u odnosu na brzinu odgovarajućeg talasa vode.
2. Pri ekstremno visokim koncentracijama, zavisno od početne dubine u rezervoaru  $H$ , ili uopšte ne dolazi do tečenja mešavine, ili se talas, ubrzo po pokretanju, zaustavlja. Na primer, pri koncentraciji od oko  $C_v=33\%$ , domet talasa je reda  $(1-2) \cdot H$ , a za  $C_v=27\%$  iznosi  $(10-15) \cdot H$ .
3. Dubine koje se javljaju pri tečenju mešavina su veće od onih pri tečenju vode i povećavaju se sa porastom koncentracije. Odnos dubina mešavine i vode pri istim graničnim uslovima, u datim eksperimentima dostizao je vrednost 2:1.
4. Talase mešavina karakteriše strmo čelo talasa, pa se u zoni čela javljaju i najveće razlike dubina u odnosu na talas vode.

### 4. Literatura

- [1] JOVANOVIĆ, B., SIKIMIĆ, J., KOMATINA, D. (1997). Reološka svojstva rudne jalovine. **Prvi kongres JDVB**, Budva.

- [2] KOMATINA, D. (1993). **Analiza tečenja gustih mešavina u otvorenim tokovima.**  
Magistarska teza, Građevinski fakultet, Beograd.
- [3] KOMATINA, D., JOVANOVIĆ, M. (1997). Experimental study of steady and unsteady free-surface flow with water-clay mixtures, **Journal of Hydraulic Research**, IAHR, Vol.35, No.5.
- [4] O'BRIEN, J.S., JULIEN, P.Y. (1988). Laboratory analysis of mudflow properties. **Journal of Hydraulic Engineering**, ASCE, Vol.114, No.8, 244-261.