

Problemi numeričke simulacije poplavnih talasa izazvanih rušenjem brana od jalovine

Miodrag Jovanović

Gradjevinski fakultet, Beograd

Rezime. U ovom radu se razmatraju problemi sa kojima su suočeni inženjeri prilikom izrade hidrauličkog dela Projekta sistema osmatranja i obaveštavanja na području ugroženom od rušenja brane. Zakonom je predviđeno da se ovaj projekat mora izraditi za sve visoke brane, uključujući brane od jalovine. Osnovu projekta čine proračuni prostiranja poplavnog talasa izazvanog rušenjem brane, pri čemu još uvek ne postoji opšte prihvaćena metodologija koja bi se primenila na talase fluidizovane jalovine. Osnovni problemi u razvoju i primeni računskog modela sastoje se u: (a) definisanju načina rušenja brane, (b) proceni zapremine mešavine vode i jalovine koja otekne iz deponije, odnosno zapremine poplavnog talasa, (c) izboru reološkog modela fluidizovane jalovine i (d) realizaciji laboratorijskih i terenskih merenja koja bi poslužila za kalibraciju parametara i proveru računskog modela u celini. Mogućnost rešavanja navedenih problema razmotrena je kroz primer iz prakse.

Ključne reči: jalovišta, prolom brane, fluidizovana jalovina, numerički modeli.

1. Uvod

Brane od jalovine spadaju u kategoriju visokih brana, za koje važi zakonska obaveza izrade Projekta sistema osmatranja i obaveštavanja na području ugroženom od poplavnog talasa, koji bi se formirao u slučaju rušenja brane. U pogledu kompletnosti i kvaliteta projektne dokumentacije, ove brane moraju u potpunosti biti izjednačene sa branama na vodenim akumulacijama, tim pre što je rizik od rušenja brana od jalovine relativno visok iz više razloga:

- Izložene su većem opterećenju od odgovarajućih nasutih brana na vodenim akumulacijama, jer je gustina mulja u deponiji veća od gustine vode.
- Tehnologija izgradnje je takva da novi slojevi, u potpunosti ili delimično, počivaju na slabo nosećim (muljevitim) slojevima iz prethodnog ciklusa nasipanja, što smanjuje opštu stabilnost objekta.
- Brane od jalovine se formiraju kao objekti od homogenog materijala (bez glinenog jezgra), tako da je nivo provirnih voda visok, pa je nedovoljna, ili oštećena drenaža često uzrok havarija, kao što je u više navrata zabeleženo kod nas i u svetu [11].
- Nizvodne kosine ovih brana se po pravilu ne štite od erozije.
- Loše dimenzionisan ili oštećen derivacioni odvod (tunel ili kanal), predstavlja potencijalnu opasnost po sigurnost brane u periodu pojave velikih voda u slivu.

- Usled likvifikacije, zemljotresi deluju razornije na brane od jalovine nego na ostale nasute brane.
- Nivo oskultacije brana na jalovištima je kod nas generalno niži od onog na hidrotehničkim nasutim objektima, tako da je umanjena mogućnost pravovremenog reagovanja na pojavu nedozvoljenih deformacija.

Uredbom o sistemu osmatranja i obaveštavanja [12] definisani su uslovi i kriterijumi za proračun hidrauličkih posledica rušenja brana na vodenim akumulacijama, što nije slučaj sa branama jalovišta. Razlog je jednostavan. Fenomen tečenja nenjutnovskih dvofaznih fluida - kao što je "fluidizovana jalovina" (mešavina vode i jalovine sa visokom koncentracijom čvrste faze) - tek je u fazi naučnih istraživanja, tako da još nije razradjena metodologija koja bi rutinski bila primenljiva u inženjerskoj praksi.

Kod nas se ovaj problem rešavao tako što su proračuni obavljani pod pretpostavkom da iz deponije otiče čista voda, sa obrazloženjem da vodeni talasi daju veće maksimalne protoke na nizvodnom području i imaju veću brzinu prostiranja od talasa fluidizovane jalovine, tako da su rezultati na strani sigurnosti.

Ovakav pristup ima dva bitna nedostatka. Prvo, za obeležavanje ugroženog područja na terenu, bitno je što tačnije odrediti maksimalne kote plavljenja, čemu ne ide u prilog hipoteza o čistoj vodi. Naime, *talasi fluidizovane jalovine imaju više maksimalne kote od odgovarajućih vodenih talasa*, kao što pokazuju laboratorijska ispitivanja [8] i rezultati proračuna [6], [7]. Drugo, pretpostavka o čistoj vodi nameće nepotrebno duge (i skupe) proračune, s obzirom da se talasi jalovine amortizuju brže od vodenih talasa.

Kao što će se videti u nastavku, numerička simulacija poplavnih talasa fluidizovane jalovine nije moguća bez uvođenja konstitutivnih reoloških veza za ovu vrstu dvofaznog fluida, niti je validna bez prethodnog eksperimentalnog utvrđivanja vrednosti parametara koji figurišu u ovim reološkim vezama. S obzirom da je fenomen o kome je reč veoma složen i nedovoljno izučen, primena numeričkih modela u ovoj oblasti ima u ovom trenutku pionirski karakter, pa je u interpretaciji rezultata i donošenju zaključaka potrebna velika obazrivost i kritičnost. Kako praktično nema mogućnosti prave verifikacija modela, neophodno je da se proračuni paralelno obave i na klasičan način - sa vodom, kako bi se bar nekako stekao uvid u realnost rezultata.

2. Fizički i matematički modeli u simulaciji proloma brane od jalovine

U delu naše stručne javnosti postoji uverenje da se problem proloma brane može tačnije rešavati pomoću hidrauličkog - fizičkog modela nego pomoću numeričkog modela. Ovo mišljenje je diskutabilno, pogotovu kada su u pitanju brane od jalovine. Naime i kod fizičkih modela postoji niz faktora koji nepovoljno utiču na kvalitet rezultata. Pored nedostataka koji se ispoljavaju kod svih rečnih modela (distorzija, efekti razmere,

izražena sekundarna strujanja, greške u merenju), kod fizičkog modela fluidizovane jalovine javljaju se velike teškoće u izboru radnog fluida.

Principijelno, dva su pristupa moguća. Ako se na modelu koristi prirodna jalovina, koncentracija čvrste faze zbog efekata razmere mora biti smanjena, a ako se koristi veštački komponovan fluid, moraju se zadovoljiti određeni zakoni hidrauličke i reološke sličnosti. U oba slučaja teško se prevazilazi problem tariranja modela, s obzirom na oskudnost podataka koji bi se u tom cilju mogli iskoristiti.

Prednost matematičkih modela je u tome što se relativno brzo i lako mogu proveriti razne opcije u cilju boljeg razumevanja uticaja pojedinih faktora. Medjutim, teškoće sa verifikacijom modela su i ovde prisutne. Optimalni pristup je (ako to sredstva i rokovi dozvoljavaju), paralelna primena računskog i fizičkog modela, uz neophodna merenja u laboratoriji i na terenu.

3. Problemi izrade i korišćenja matematičkih modela

Ovi problemi obuhvataju: (a) definisanje načina rušenja brane, (b) procenu zapremine poplavnog talasa, (c) izbor reološkog modela za numeričku simulaciju tečenja mešavine vode i jalovine i (d) kalibraciju parametara i proveru modela. Navedeni problemi se ne mogu rešavati bez određenih pretpostavki i bez oslonca na rezultate laboratorijskih i terenskih merenja.

3.1. Način rušenja brane od jalovine

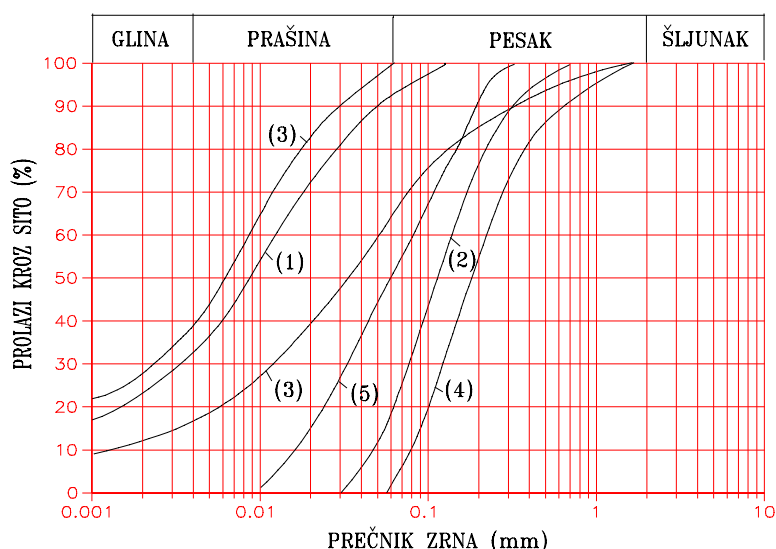
Do rušenja brane na jalovištu može doći usled nekontrolisane sufozije (nedovoljan ili oštećen drenažni sistem) i preliivanja (pod-dimenzionisan ili oštećen derivacioni objekat, oštećenje brane usled sleganja, zemljotresa, sabotaze, itd.).

S obzirom na dimenzije i konstruktivne karakteristike objekta, *rušenje je postepeno i delimično*, uz formiranje breše čija je dinamika razvoja podložna proceni. Najčešće se pretpostavlja da je breša trapeznog oblika, sa nagibom kosina koji odgovara uglu unutrašnjeg trenja peščanog materijala. Konačne dimenzije breše usvajaju se u zavisnosti od konkretnih uslova.

U hidrauličkom smislu isticanje kroz brešu se tretira kao preliivanje preko širokog praga, a hidrogram u profilu brane predstavlja uzvodni granični uslov za dolinu nizvodno od brane. *Ovaj hidrogram zavisi od toga kako je definisan zakon razrade breše po vremenu, od trajanja razrade i zapremine vode i jalovine u deponiji.* Imajući u vidu rezultate eksperimenata sa preliivanjem nasutih objekata od homogenog peščanog materijala [5], za brane od jalovine se može pretpostaviti da je taj zakon linearan. Za procenu trajanja razrade breše, pored navedenih eksperimentalnih rezultata, mogu se koristiti i određene korelacione zavisnosti iz literature, utvrđene na osnovu podataka o rušenju nasutih brana u prošlosti [9].

3.2. Procena zapremine poplavnog talasa

Zapreminu mešavine vode i jalovine koja bi u slučaju proloma brane otekla iz deponije nije moguće tačno odrediti. Nepoznat je uticaj faktora kao što su granulometrijski sastav, stepen konsolidacije, i dr., tako da se za sada mogu vršiti samo grube procene na osnovu oskudnih podataka o havarijama u prošlosti, ili na bazi granulometrijskog sastava jalovine. Primera radi, na Slici 1 prikazane su tipične granulometrijske krive jalovina bakra, kao i kriva koja se odnosi na jalovinu iz deponije "Veliki Krivelj" [7].



Slika 1. Tipične granulometrijske krive jalovina bakra: (1) - mulj iz "plaže"; (2) - peščani materijal iz tela brane; (3) - anvelopa muljevitog materijala iz "plaže"; (4) - anvelopa peščanog materijala; (5) - jalovina iz deponije "Veliki Krivelj" [7].

Procenjeno je da bi 60-70% zapremine jalovine bilo pokrenuto sa vodom u slučaju proloma brane, što odgovara procentu čestica sitnijih od 0.1 mm koje čine osnovnu komponentu čvrste faze u mešavini. Ova procena je u skladu sa iskustvom stečenim prilikom havarija nekih naših jalovišta.

3.3 Izbor reološkog modela

Fluidizovana jalovina predstavlja gustu mešavinu promenljive koncentracije čvrstih čestica u prostoru i vremenu. Reč je o nenjutnovskom fluidu za koga se najpre mora usvojiti adekvatan reološki model, a zatim laboratorijski odrediti vrednosti parametra tog modela. Potrebno je takodje ustanoviti režim tečenja ovakvih fluida u zavisnosti od koncentracije čvrste faze (odnosno od efektivne viskoznosti), kao i definisati način proračuna gubitaka energije utrošene na savladjivanje linijskih i lokalnih otpora.

U osnovi matematičkih modela linijskog tečenja gustih mešavina su jednačine održanja mase i količine kretanja, čiji je najjednostavniji oblik ¹:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \cdot \left(\frac{\partial Z}{\partial x} + I \right) = 0 \quad (2)$$

gde su nezavisno promenljive, odstojanje (x) i vreme (t), a zavisno promenljive, protok (Q) i kota nivoa (Z). Površina poprečnog preseka (A) je sekundarna zavisno promenljiva, a (g) je gravitaciono ubrzanje. Ove jednačine se, uz odgovarajuće početne i granične uslove, rešavaju numeričkim metodama.

Da bi se osnovne jednačine (1)-(2) primenile na mešavinu vode i jalovine, neophodno je uvesti konstitutivnu, ili reološku vezu smičućeg napona i brzine deformacije za ovu vrstu fluida, tek na osnovu koje se može definisati nagib linije energije (I) u dinamičkoj jednačini (2). Pri tome je nužna pretpostavka o izotropnosti i kontinualnosti mešavine.

Fluidizovana jalovina spada u kategoriju nenjutnovskih, *viskoplastičnih fluida*, za koje je karakteristično da se zahvaljujući visokoj koncentraciji čestica i njihovoj koheziji, neće pokrenuti pod dejstvom smičućih napona dok ovi ne premaše određenu *graničnu (smičuću) nosivost* (τ_c), koja najviše zavisi od koncentracije frakcija ispod 0.062 mm. Ovakve mešavine se pretežno teku u laminarnom režimu. Opšti oblik reološke veze je:

$$\tau = \tau_c + \eta \cdot \left(\frac{du}{dz} \right)^m, \quad \tau > \tau_c \quad (m \geq 1) \quad (3)$$

gde je τ - tangencijalni napon, du/dz - brzina klizanja (gradijent brzine u vertikalnom pravcu), η - *koeficijent plastične viskoznosti* mešavine, a m - empirijski eksponent. Ako je $\tau \leq \tau_c$, nema tečenja. Može se pokazati na osnovu (3) da je veličina linijskih gubitaka određena u opštem slučaju:

$$I = \frac{\eta}{g \cdot \rho_m} \cdot \left[\frac{(b+2) V}{R^{b+1}} + \frac{b+2}{2R^b} \left(\frac{\tau_c}{\eta} \right)^b \right]^{1/b} \quad (4)$$

gde je $b=1/m$, ρ_m - gustina mešavine, V - srednja profilska brzina, a R - hidraulički radijus. Parametri modela, granična nosivost (τ_c), viskoznost (η) i eksponent (m)

¹ Postoji i prošireni oblik navedenih jednačina koji omogućava obuhvatanje složenog korita sa inundacijama, kao i odgovarajući oblici istih jednačina za proračun prostorno dvodimenzionog, ili ravanskog tečenja.

određuju se eksperimentalno. U specijalnom slučaju kada je $m=b\approx 1$ (Bingham-ov fluid), sledi [3], [8]:

$$I = \frac{3\eta \cdot V}{g \cdot \rho_m \cdot R^2} + \frac{3}{2} \frac{\tau_c}{g \cdot \rho_m \cdot R} \quad (5)$$

U literaturi se može naći i ovakav izraz [4]:

$$I = \frac{2\eta \cdot V}{g \cdot \rho_m \cdot R^2} + \frac{\tau_c}{g \cdot \rho_m \cdot R} \quad (6)$$

3.4 Kalibracija parametara i provera modela

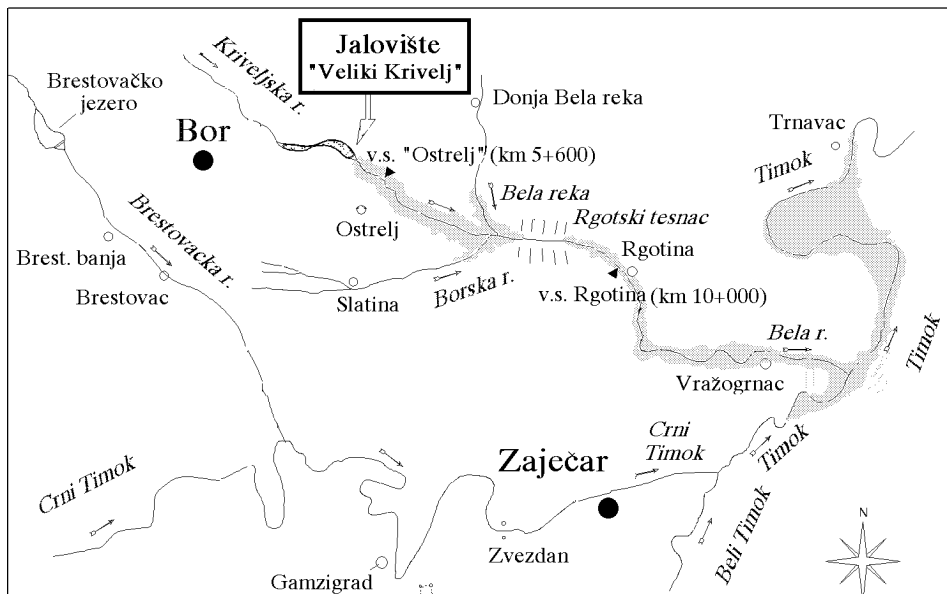
Ključni problem primene modela je kalibracija parametara τ_c i η . Ona je moguća jedino laboratorijskom analizom uzoraka, pomoću viskometara. Prvi koraci na ovom planu su učinjeni kod nas na Građevinskom fakultetu u Beogradu [8]. Vrednosti ovih parametara u funkciji koncentracije mogu se naći u literaturi [1], [4], [10] i kreću se u granicama $\tau_c=0.5-100$ Pa i $\eta=0.02-10$ Pa·s. Treba naglasiti da do sada nije razmatrano pitanje tiksotropije fluidizovanih jalovina, tako da se u računskom modelu mora pretpostaviti nepromenljivost reoloških parametara (odnosno koncentracije) u prostoru i vremenu, što svakako predstavlja ograničenje matematičkog modela. U toku je provera računskog modela na osnovu eksperimenata opisanih u radu [8].

4. Primer primene računskog modela

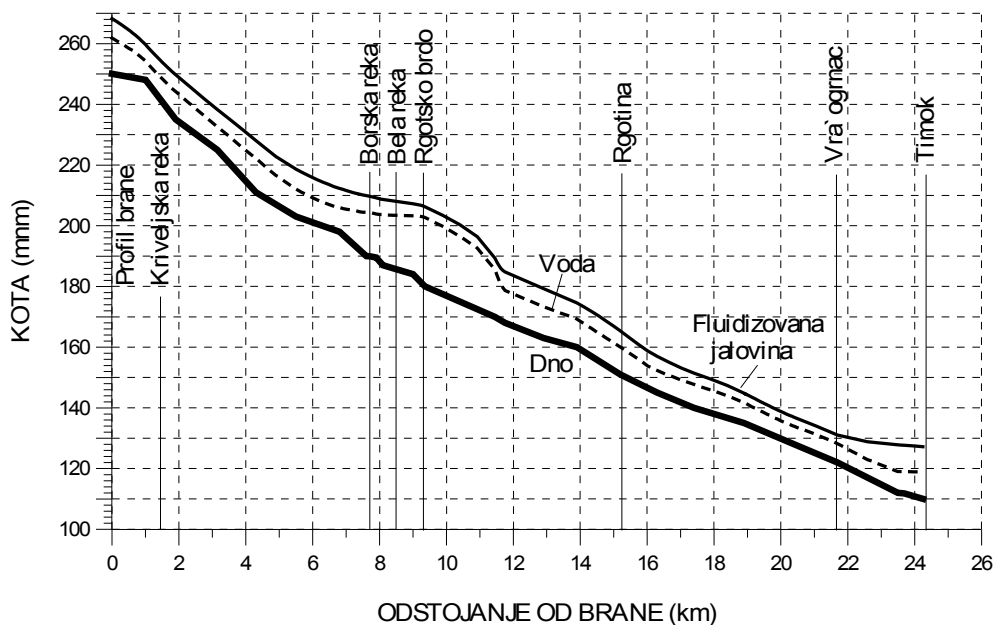
Izloženi pristup ilustrovaće se primerom iz prakse. Reč je o numeričkoj simulaciji proloma brane jalovišta "Veliki Krivelj" koja je trenutno u fazi formiranja [7]. Ovo jalovište u blizini Bora, formirano je u dolini Kriveljske reke, 7.6 km uzvodno od ušća Kriveljske reke u Borsku reku. Poplavni talas izazvan eventualnim rušenjem pomenute brane, prostirao bi se dolinama Kriveljske i Borske, odnosno Bele reke, do ulaska u dolinu Timoka (Slika 2).

Na Slici 3 je prikazan uzdužni profil maksimalnih kota nizvodno od brane za najjenpovoljniju varijantu konačno ispunjene deponije. Poređenjem ovih rezultata sa rezultatima dobijenim za čistu vodu pri istim konturnim uslovima, može se konstatovati da su maksimalne kote plavljenja kod fluidizovane jalovine znatno više od onih kod vode. Obrnuto važi za maksimalne protoke.

Numerička simulacija je obavljena za slučaj postepenog rušenja brane trajanja 1 sat, pri 100-godišnjoj velikoj vodi u recipijentu, uz pretpostavku da će iz deponije isteći 60% jalovine. Korišćen je model Bingham-ovog fluida, sa vrednostima parametara $\tau_c = 10$ Pa i $\eta = 5$ Pa·s ($\rho_m = 1200$ t/m³). Razlike sračunatih maksimalnih kota u odnosu na čistu vodu kreću se od 1-6 m, u zavisnosti od nagiba korita i širine doline.



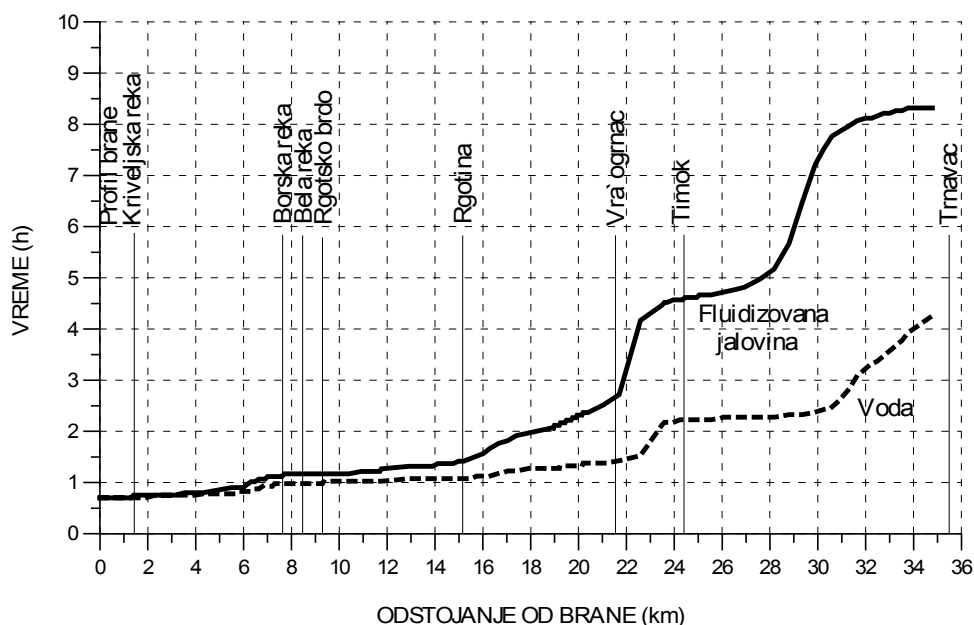
Slika 2. Skica šire lokacije jalovišta "Veliki Krivelj".



Slika 3. Anvelopa maksimalnih kota za talas fluidizovane jalovine i talas vode, nakon hipotetičkog proloma brane jalovišta "Veliki Krivelj" pri najvećem stepenu ispunjenosti deponije (kota 350 mm, zapremina deponije $48 \times 10^6 \text{ m}^3$, visina brane 100 m) [7].

Na Slici 4 data je uporedna analiza brzine prostiranja talasa vode i talasa jalovine. Rezultati pokazuju da je vrhu talasa fluidizovane jalovine potrebno dva puta duže vreme

da dostigne dolinu Timoka nego vrhu talasa vode. Konstatacija da se talas jalovine sporije kreće od talasa vode, ukazuje na to da postoji bolja mogućnost blagovremenog upozorenja. Iako prikazani rezultati nisu mogli biti verifikovani, oni daju određenu predstavu o stepenu ugroženosti područja nizvodno od brane.



Slika 4. Uzdužni profil vremena dostizanja maksimalnih kota plavljenja nakon rušenja brane "Veliki Krivelj" pri najnepovoljnijim uslovima (konačna faza eksploatacije) [7].

Razmatranja u ovom radu ukazuju na težinu problema i govore o prvim koracima u pravcu njegovog rešavanja. Veoma je važno da se kod nas *odmah pristupi sistematskom odredjivanju osnovnih fizičkih i reoloških svojstava jalovina*, prikupe podaci o ranijim havarijama, a ukoliko dodje do nove havarije, odmah organizuju detaljna terenska snimanja². Na Građevinskom fakultetu u Beogradu su u toku laboratorijska ispitivanja koji treba da obezbede eksperimentalnu bazu podataka za dalji razvoj i kalibraciju računskih modela.

4. Zaključci

² Kao pozitivan primer može nam poslužiti japanski Univerzitet iz Kjota koji je poslao ekipu svojih stručnjaka u Italiju (!), sa zadatkom da izvrši snimanje posledica rušenja brane odlagališta kalcijum-fluoridne jalovine kraj mesta Stava, 1985. godine.

1. Numerička simulacija poplavnih talasa izazvanih rušenjem brana od jalovine tek je u početnoj fazi razvoja. Paralelno sa razvojem matematičkog modela obavljaju se na Građevinskom fakultetu u Beogradu eksperimenti koji treba da posluže za verifikaciju ovog modela.
2. Imajući u vidu dimenzije i konstruktivne karakteristike brane od jalovine, u proračunima se može pretpostaviti da je rušenje postepeno i delimično, a proces razrade breše, linearan po vremenu.
3. Zapreminu poplavnog talasa koji se formira tokom rušenja brane nije moguće tačno odrediti. Za sada su moguće samo grube procene na osnovu granulometrijskog sastava jalovine i iskustvenih podataka.
4. Konstitutivne jednačine matematičkog modela moraju adekvatno opisati reološke osobine fluidizovane jalovine. Kako su mogućnosti kalibracije u sadašnjem trenutku skromne, uputno je koristiti najjednostavniji Bingham-ov dvoparametarski model, uz obavezno laboratorijsko određivanje vrednosti koeficijenta viskoznosti i granične nosivosti konkretne jalovine, u funkciji koncentracije čvrste faze.
5. Prva primena računskog modela zasnovanog na izloženim principima, pokazuje da su uz sva ograničenja (hipoteze o konstantnosti koncentracije i reoloških parametara, izotropnosti i kontinualnosti mešavine), rezultati proračuna fizički realni, imajući kao reper, odgovarajuće rezultate dobijene za čistu vodu.
6. Talasi fluidizovane jalovine imaju manje maksimalne protoke i brzine prostiranja, ali veće maksimalne kote od vodenih talasa. Step en ublaženja talasa nizvodno od brane raste sa povećanjem vrednosti parametara τ_c i η .
7. U cilju daljeg usavršavanja računskih postupaka, neophodno je preduzeti sistematska reološka ispitivanja naših jalovina, prikupiti sve podatke o ranijim havarijama i organizovati detaljna terenska snimanja u slučaju novih incidenata.

Literatura

- [1] Chang, C., Tong, Q., Lee, S., *Study of Characteristics of Pipeline Transporting Red Mud Slurry*, III. International Symposium on Liquid-Solid Flows, ASME, Chicago, 1988.
- [2] Chong, J.S., Christiansen, E.B., Bear, A.D. *Rheology of Concentrated Suspensions*, Journal of Applied Polymer Science, Vol. 15, 1971.
- [3] Fread, D.L., *The NWS Dam-Break Flood Forecasting Model*, Hydrologic Research Laboratory, Maryland, 1984.
- [4] Jayapalan, J., Duncan, M., Seed, B.H., *Analyses of Flow Failures of Tailings Dams*, Journal of Geotechnical Eng., ASCE, Vol.109, No.2, 1983.

- [5] Jovanović, M. *Modeliranje procesa erozije nasutih objektata izloženih prlevanju*, Doktorska teza, Gradjevinski fakultet Beograd, 1987.
- [6] Jovanović, M., *Numeričko modeliranje tečenja gustih mešavina*, časopis "Vodoprivreda", 1991/3-4, Beograd, 1991.
- [7] Jovanović, M., *Projekat sistema osmatranja i obaveštavanja na području ugroženom od rušenja brane flotacijskog jalovišta "Veliki Krivelj"*- Opšti deo sa hidrauličkim proračunima, Beograd, 1994.
- [8] Komatina, D., Jovanović, M., *Experimental Study of Steady and Unsteady Free-Surface Flow with Water-Clay Mixtures*, Journal of Hydraulic Research No. 5, 1997.
- [9] MacDonald, T.C., Langridge-Monopolis, J., *Breaching Characteristics of Dam Failures*, Journal of Hydraulic Division ASCE, Vol.110, No.5, 1984.
- [10] O'Brien, J.S., Julien, P.Y., *Laboratory Analysis of Mudflow Properties*, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol. 114, Aug. 1988.
- [11] Penman, A.D.M., *The Safety and Rehabilitation of Tailings Dams*, Water Power & Dam Constuction, May, 1990.
- [12] *Uredba o sistemu osmatranja i obaveštavanja*, Službeni glasnik Skupštine Republike Srbije od 16.02.1990.
- [13] Wahler & Associates *Evaluation of Mill Tailings Disposal - Practices and Potential Dam Stability Problems in Southwestern United States*, Bureau of Mines, US Dept. of the Interior, 1974.