

PREGLED I PRIMENA REZULTATA SAVREMENIH HIDRAULIČKIH ISTRAŽIVANJA U PROJEKTOVANJU PRELIVA VISOKIH BRANA (treći deo)

Živodar ERČIĆ
Energoprojekt, Beograd
E-mail: erra@eunet.yu

REZIME

U trećem delu rada ukratko se opisuju bučnice sa prinudnim hidrauličkim skokom formiranim pomoću blokova ili pragova ili kombinacijom ova dva osnovna elementa. Izneti su rezultati dosadanih modelskih ispitivanja i opažanja na izvedenim objektima. Priloženi su pomoćni dijagrami i empirijske formulae za približno određivanje dimenzija blokova i pragova. Podvučen je uticaj kavitacije na sigurnost ovih objekata i neophodnost realizacije hidrauličkih modelskih ispitivanja.

Ključne reči: prinudni hidraulički skok, blokovi, pragovi

1. UVOD I SADRŽAJ TREĆEG DELA RADA

Poznato je da se klasičan hidraulički skok neće formirati u prostoru bučnice ako je dubina donje vode (h_{dv}) manja od druge spregnute dubine (h_2^*). Kako je, pak, odnos $h_{dv} < h_2^*$ veoma česta pojava u praksi, postoji veliki rizik da fundament bučnice sa klasičnim hidrauličkim skokom bude potkopan i objekat porušen, ukoliko se ne predvide obimne i skupe mere zaštite dna rečnog korita od erozije.

Međutim, hidraulički skok će se zadržati u projektovanom prostoru u što većem intervalu promene protoka ukoliko se izmeni geometrijski oblik dna bučnice sa klasičnim hidrauličkim skokom.

Efikasno i prosto rešenje je bučnica sa horizontalnim dnom, spuštenim ispod dna rečnog korita ili bučnica sa kontinualnim pragom na horizontalnom dnu. Moguća je i kombinacija ova dva tipa.

Geometrijski složeniji oblik imaju bučnice sa blokovima na horizontalnom, obično spušenom dnu, raznih oblika i dimenzija, postavljenih u jednom ili dva reda i često kombinovanih sa kontinualnim pragovima. Zadatak im je da formiraju i održe hidraulički skok u prostoru uzvodno od njih. Logična posledica primene ovih elemenata je kraća dužina bučnice u odnosu na onu sa klasičnim hidrauličkim skokom ili bučnice sa spušenim dnom bez dodatnih elemenata.

Blokovi, pragovi ili njihova kombinacija u okviru objekta za rasipanje kinetičke energije vodnog toka imaju sledeće tri glavne funkcije:

- zaustavnu (reaktivnu), zahvaljujući kojoj se u prostoru ispred dodanih elemenata formira aulički skok pri dubini donje vode manjoj od h_2^* ,
- disipativnu, zbog koje se povećava rasipanje kinetičke energije usled formiranja dodatnih zona sa povratnim strujanjem,
- raspedeljujuću, zbog koje se vodni tok u bučnici širi, odnosno smanjuje specifični protok na kraju bučnice (slučaj kada je bučnica šira od dovodnog kanala).

Istraživanja o učinku dodatnih elemenata ukazuju na sledeće:

- elementi sa vertikalnim prednjim licem imaju izraženiju zaustavnu funkciju od elemenata sa prednjim licem u nagibu;
- elementi sa oštrim (nezaobljenim) uglovima efikasniji su od onih sa zaobljenim uglovima;
- kontinualni prag ima izraženiju zaustavnu funkciju od blokova iste visine;
- kontinualni pragovi bolje raspoređuju tok po širini bučnice u odnosu na blokove;

- kontinualni pragovi su manje izloženi kavitacionoj eroziji od blokova (sem od blokova specijalnog oblika);
- blokovi imaju izraženiju disipativnu funkciju od kontinualnih pragova, jer se osnovni tok „cepa“ u više struja u kojima se kinetička energija intenzivnije rasipa u odnosu na prag;
- zaustavno dejstvo pragova i blokova raste sa približavanjem njihovog položaja suženom preseku sve do $L_s = (1 - 1,1) h_2$.

Za bučnice sa elementima prostijeg oblika, kao što su pragovi, razrađeni su postupci za određivanje hidrauličkih dimenzija bučnice i pragova, kavitacionog potencijala, konstruktivne stabilnosti bučnice i elemenata u njoj i erozije nizvodnog rečnog dna.

Hidrauličke dimenzije i položaj dodatnih elemenata i karakteristike učinka bučnica sa složenijom geometrijom (blokovi, kombinacije sa pragovima) teško je računati pomoću matematičkih modela, pa se ove vrednosti obično određuju ispitivanjima na hidrauličkom modelu. Posebno to važi za fluktuacije pritiska, kavitaciju i eroziju dna u donjoj vodi.

U ovom, trećem, delu rada prikazane su formule za približno određivanje hidrauličkih dimenzija bučnice sa složenom geometrijom dna, što omogućava izbor varijante bučnice sa prihvatljivim karakteristikama učinka i troškovima izgradnje. Ipak, konačne dimenzije bučnice i elemenata na njenom dnu trebalo bi da se odrede na osnovu laboratorijskih hidrauličkih ispitivanja.

2. BUČNICE SA KONTINUALNIM PRAGOM

U ovom tipu bučnice prinudni hidraulički skok se formira postavljanjem praga, visine s , na udaljenosti L_s , mereno od početka skoka.

Jedno od prvih rešnja za zadržavanje površinskog vrtložnog valjka u projektovanom prostoru patentirao je T. Rebok (Rehbock) 1925. godine. Rebokov nazubljeni prag, postavljen na kraju bučnice, kao i razne njegove modifikacije, daju zadovoljavajući učinak za male visine brana.

Strujanje u bučnici sa pragom ispitivano je na brojnim hidrauličkim modelima. Prema literaturi [1], a u zavisnosti od vrednosti L_s , s i h_{dv} , moguća je pojava osam tipova hidrauličkog skoka, prikazanih na slici

2.1. Navedeni tipovi skoka se formiraju u zavisnosti od L_s/h_R^* kako sledi:

- Tipovi VI*, VI i V pri

$$0 \leq \frac{L_s}{L_R^*} \leq 0.12 \text{ ili pri } 0,5 \leq C_D$$
- Tip IV pri

$$0.2 \leq \frac{L_s}{L_R^*} \leq 0.4 \text{ ili pri } 0,18 \leq C_D \leq 0.50$$
- Tip III pri

$$0.4 \leq \frac{L_s}{L_R^*} \leq 0.6 \text{ ili pri } 0,05 \leq C_D \leq 0.18$$
- Tipovi II*, II i I

$$0.6 \leq \frac{L_s}{L_R^*} \text{ ili pri } 0,01 \leq C_D \leq 0.12$$

U gornjim izrazima je:

- L_R^* - dužina valjka klasičnog hidrauličkog skoka

$$L_R^*/h_1 = -12 + 8\alpha_R \tanh(F_1/\alpha_R)$$

$$\alpha_R = 20 \text{ za } h_1/b = 0.1$$

$$\alpha_R = 12.5 \text{ za } 0.1 \leq h_1/b = 0.7$$

$$b = \text{širina bučnice}$$
- C_D - koeficijent konturne sile u formuli za konturnu silu po 1 m dužine praga

$$P = C_D (V_1^2/2)s$$

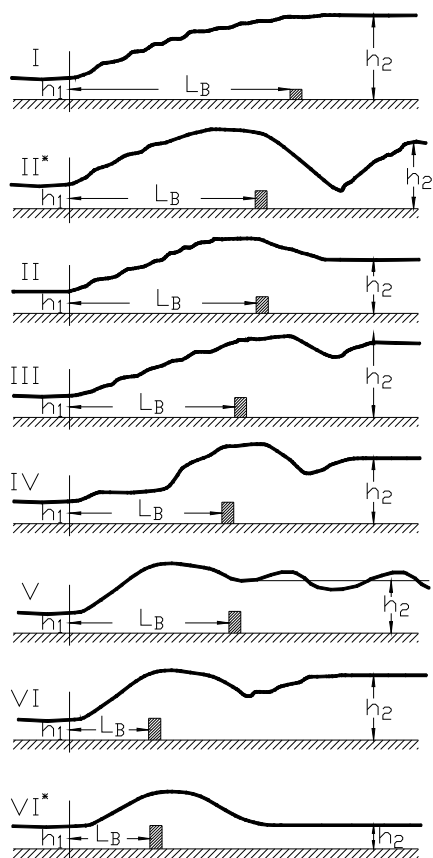
U literaturi [1] navedena je sledeća formula za određivanje vrednosti koeficijenta C_D

$$C_D = \left\{ (\alpha - 1) \left[2F_1^2 - \alpha(1 + \alpha) \right] \right\} / (F_1^2 \alpha \beta) \quad 2.1$$

gde je: $\alpha = h_{dv}/h_1$; $\beta = s/h_1$

U okviru istraživanja opisanih u [1], izučavan je i uticaj drugog reda praga, visine s , postavljenog na međurastojanju ΔL_s . Zaključeno je da, u normalnim okolnostima, drugi red veoma malo utiče na dodatno smanjenje druge spregnute dubine.

Rezultati istraživanja, navedeni u [1], imaju više kvalitativan nego kvantitativan doprinos u izučavanju prinudnog hidrauličkog skoka u bučnici sa kontinualnim pragom.



Slika 2.1. Tipovi prinudnog hidrauličkog skoka prema [1]

Praktično, najkorisnija sistematizacija rezultata modelskih ispitivanja bučnica sa pragom realizovanih do kraja prošlog veka, prikazana je u literaturi [2].

Osnovni zaključak dotadašnjih ispitivanja je da se u bučnici sa kontinualnim pragom mogu da formiraju sledećih pet osnovnih tipova hidrauličkog skoka u zavisnosti od veličine F_1 , h_1 , h_{dv} i $S = s/h_1$.

- **A skok** sa krajem valjka iznad praga i malim erozionim potencijalom
- **B skok** sa nižom donjom vodom i krajem valjka nizvodno od praga; povećan erozioni potencijal
- **B min skok** sa sekundarnim površinskim valjkom i uranjanjem mlaza u glavni tok koji ne uranja do dna korita; kritičan erozioni potencijal

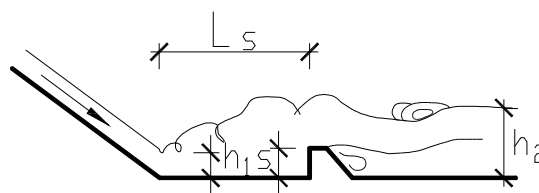
- **C skok** sa neodgovarajućom dubinom donje vode i sa uranjanjem mlaza u glavni tok koji udara u dno rečnog korita; moguća velika erozija dna
- **Talasasti skok** sa burnim tokom iznad praga i talasastim strujanjem u donjoj vodi (skok je odbačen iz bučnice) i neprihvatljivim učinkom rasipanja energije; erozija dna je velika

Generalno, skok tipa B se preporučuje kao efikasan način rasipanja energije.

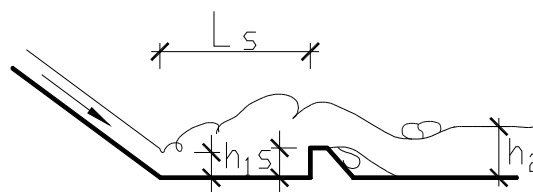
Tipovi skoka prema literaturi [2] i tipovi prikazanu u literaturi [1] su u sledećoj vezi:

- Tip A = tip I; Tip B = tip II, (II*); Tip B_{min} = tip III; Tip C = tip IV; Talasasti tip = tip V

Na slikama 2.2 i 2.3 šematski su prikazani prinudni hidraulički skokovi tipa B i B_{min}.



Slika 2.2. Prinudni hidraulički skok tipa B



Slika 2.3. Prinudni hidraulički skok tipa B_{min}

U bučnici sa pragom obrazovaće se sledeća tri tipa skoka sa prihvatljivim učinkom rasipanja energije, u zavisnosti od relativnog položaja praga $\lambda = L_S/L_R$.

- Skok A pri $0.8 < \lambda \leq 1.0$
- Skok B pri $0.65 < \lambda < 0.8$
- Skok B_{min} pri $0.55 < \lambda < 0.65$

U sledećim jednačinama osnovni članovi su relativna visina praga $S = s/h_1$; relativna lokacija praga $\lambda = L_s/L_R$; potrebna relativna druga spregnuta dubina $Y = h_2/h_1 = Y^* - \Delta Y_s$ i Frudov broj $F_1 = V_1/(h_1)^{1/2}$.

Jednačina za određivanje veličine ΔY_s je:

$$\Delta Y_s = 0.7S^{0.7} + 3S(1-\lambda)^2 \quad 2.2$$

Da bi se formirao hidraulički skok pri bilo kojoj visini S , potreban je odgovarajući minimalni Frudov broj F_{1min} . U protivnom, prag gubi zaustavnu funkciju. S druge strane, bilo kojoj vrednosti broja F_1 odgovara izvesna maksimalna visina praga za formiranje hidrauličkog skoka. Ova vrednost je:

$$S_{max} = \frac{1}{6} F_1^{5/3} \quad 2.3$$

U praksi je ovaj parametar ograničen veličinom $S_{max} = 2h_1$, pod uslovom da je $F_1 > 4.5$

Ispitivanja na modelu su pokazala da svakoj vrednosti broja F_1 odgovara izvesna optimalna visina praga, definisana izrazom

$$S_{opt} = 1 + (F_1^{2.5} / 200) \quad 2.4$$

Izraz 2.4 važi za $3 < F_1 < 10$

Pri ovoj visini prag nije toliko nizak da ne bi bio efikasan, niti je previsok da bi izazvao pojavu uranjajućeg mlaza u donju vodu.

Dužina bučnice L_B (zbir dužina ispred i iza praga) u kojoj se zadržavaju sva tri tipa skoka (A, B i B_{min}) nešto je manja od dužine bučnice sa klasičnim hidrauličkim skokom.

Generalni zaključak u literaturi [1] je da se hidraulički skok može stabilizovati pragom u kraćoj bučnici i pri nižim nivoima donje vode u odnosu na bučnicu sa klasičnim hidrauličkim skokom. Prema tome, bučnice sa kontinualnim pragom su ekonomični i efikasni objekti za rasipanje energije vodnog toka.

Zadržavanje hidrauličkog skoka u bučnici posredstvom kontinualnog praga bila je istraživačka tema mnogih istraživača u ruskim hidrauličkim laboratorijama. Rezultati istraživanja sistematizovani su u literaturi [3]. U sledećem tekstu prikazani su neki od rezultata ovih istraživanja.

U formulama za određivanje hidrauličkih dimenzija bučnice uglavnom figurišu prva spregnuta dubina (h_1), Furdov broj (F_1), druga konjugovana dubina (h_2^*) i visina skoka ($a_s = h_2^* - h_1$).

Rastojanje (L_s) od početka skoka do praga zavisi od konkretnih uslova (erozija, kavitacija) i kreće se u granicama $L_s = (1.5 \div 6) a_s$. U slučaju da je dno rečnog korita nizvodno od slapišta vrlo erodibilno, preporučuje se da se prag što više približi početku hidrauličkog skoka ($L_s = (1.5 \div 2.0) a_s$). Ako je, pak, brzina vode V_1 velika, pa su moguća kavitaciona oštećenja praga, rastojanje L_s treba povećati ($L_s = 4.5 a_s$).

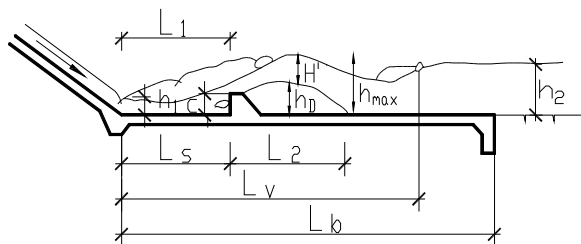
Prema literaturi [3], visina praga se određuje iz uslova da površinski valjak ispred praga bude ustaljen bez obzira na režim toka iza praga, čak i kada je tok iza praga u burnom režimu. Ova visina praga nazvana je kritičnom visinom (s_{kr}). Pri ovoj visini, reakcija praga na tok je maksimalna a takođe je maksimalno smanjenje druge spregnute dubine na kraju skoka u odnosu na drugu spregnutu dubinu (h_2^*) klasičnog hidrauličkog skoka. Smanjena druga spregnuta dubina (h_{2kr}) određuje se pomoću dijagrama $h_{2kr}/h_2^* = f(L_s/a_s; F_1)$ a kritična visina praga (s_{kr}) pomoću dijagrama $s_{kr}/h_1 = f(L_s/a_s; F_1)$. Oba dijagrama su prikazana u [3]. Vrednost h_{2kr}/h_2^* se veoma malo menja sa promenom vrednosti L_s/a_s , pa se u praktičnim proračunima može koristiti srednja kriva, odnosno zavisnost $h_{2kr}/h_2^* = f(F_1)$. Za vrednosti h_{2kr}/h_2^* koje leže ispod ove krive ne može se koristiti bučnica sa kontinualnim pragom. Odnos $h_{2kr}/h_2^* = f(F_1)$ tablarano je prikazan u sledećoj tabeli:

Tabela 2.1

F_1	3	4	5	6	7	8
h_{2kr}/h_2^*	0.82	0.75	0.69	0.635	0.59	0.57

Vrednost s_{kr}/a_s zavisi od veličina L_s/a_s i F_1 ali takođe i od nagiba uzvodnog lica praga. Eksperimenti su pokazali da se povećanjem visine praga (s) do vrednosti $s = 1.2 s_{kr}$, potapa površinski valjak ispred praga ali da potapanje praga ne utiče na režim i dubinu toka nizvodno od praga, tj. ne utiče na nivo dna bučnice nizvodno do praga, izabranog za $s = s_{kr}$.

Parametre koji definišu tok u bučnici sa pragom (slika 2.4) određuju vrednosti F_1 , L_s/a_s i s/s_{kr} .



Slika 2.4. Parametri toka za bučnicu sa pragom

Za $s/s_{kr} = 1$ i režim bez odbacivanja toka preko praga, parametri toka se određuju iz sledećih odnosa

Tabela 2.2

F_1	3.2	4	5	6	7	8
L_s/a_s	1.0	1.65	2.46	3.27	4.08	4.89

Tabela 2.3

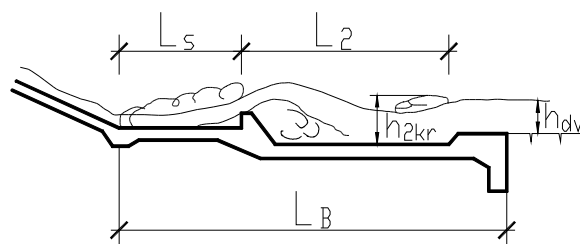
L_s/a_s	1.5	2.	3.	4.	5.	6	
3.40	$F_1=3$	1.60	1.80	2.20	2.60	3.00	3.40
	$F_1=5$	1.28	1.60	2.25	2.90	3.59	4.20
	$F_1 \geq 7$	1.65	2.00	2.70	3.40	4.10	4.80

$$L_v/h_2^* = 4.2 + 0.14 (l_s/a_s - 1)^2 \quad 2.6$$

Dužina bučnice L_B je nešto veća od dužine L_v i obično je $L_B = 6 h_2^*$

Sve napred iznete zavisnosti važe za prag sa vertikalnim uzvodnim licem. Međutim, ako je prag ugrožen od kavitacije, primenjuje se prag sa kosim uzvodnim licem. Eksperimenti pokazuju da je, za $m = 0.5$, kritični parametar kavitacije σ_{kr} značajno manji od parametra za $m = 0$ (vertikalno lice) ali je visina praga (s_{kr}), pri jednakim h_{2kr} , veća nego pri $m = 0$. U literaturi [3] su prikazane grafičke zavisnosti $h_2/h_2^* = f(s/h_1, F_1, L_s/a_s)$ za $m = 0$ i $m = 0.5$ pomoću kojih se može odrediti druga spregnuta dubina za bučnicu sa pragom za unapred izabrane vrednosti s i L_s ili obrnuto.

Ukoliko je potrebno da se kota dna bučnice poveća u odnosu na kotu određenu pomoću tabele 2.1, ili ukoliko je prirodna dubina donje vode mala, bučnica sa pragom kritične visine (s_{kr}) mora da ima dodatak nizvodno od praga sa spuštenim dnom u odnosu na dno uzvodno od praga. Na skici 2.5 šematski je prikazana bučnica sa spuštenim dnom nizvodno od praga. Bučnicom ovoga tipa obezbeđuje se prihvatljiv prelaz iz burnog u mirni tok, čak i pri $h_{dv} = (1.2 \div 1.4) h_{v1}$.



Slika 2.5. Osnovni parametri bučnice sa pragom i spuštenim nizvodnim dnom

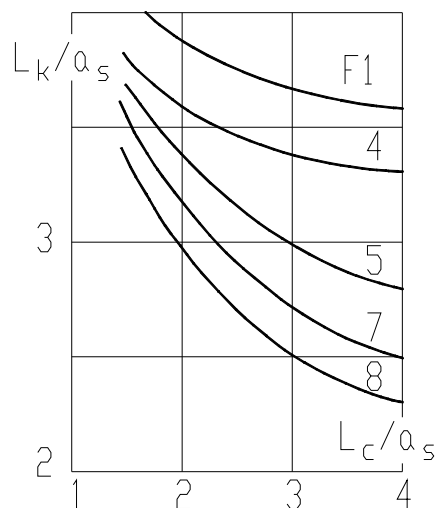
Minimalna dubina (h_{2kr}) određuje se pomoću krive h_{2kr}/h_2^* , prikazane u [3]. Na osnovu ove krive formirana je sledeća tabela:

Tabela 2.4

F_1	2.2	3	4	5	6	7	8
h_{2kr}/h_2^*	0.9	0.76	0.64	0.56	0.50	0.45	0.42

Rastojanje između početka skoka i praga je $L_s = (2 \div 3) a_s$. Ako su moguća kavitaciona oštećenja, položaj praga se pomera nizvodno na rastojanje $L_s = 4 a_s$.

Dužina nizvodnog dela bučnice sa pragom (L_k) zavisi od odnosa L_s/a_s i Frudovog broja F_1 . Određuje se pomoću grafikona prikazanog na slici 2.6. Ukupna dužina bučnice malo je veća od zbira dužina $L_s + L_k$ i približno iznosi $L_B = 1.1 (L_s + L_k)$.



Slika 2.6. Grafička zavisnost $L_k/a_s = f(L_s/a_s; F_1)$ (preuzeto iz [3])

Kao i sve ostale bučnice sa hidrauličkim skokom i ovaj tip bučnice mora da ima zaštitu od potkopavanja fundamenata bučnice sa čela i bokova. Oblik i dimenzije zaštite uglavnom zavise od preostalog erozionog potencijala vodnog toka i karakteristika tla ispod fundamenata bučnice i nizvodno od nje (stena ili rastresiti materijal). Najsigurnija zaštita je izrada betonske dijafragme na kraju i bokovima bučnice sa dnom spuštenim ispod dna procenjene konačne dubine erozione jame. U praksi se koristi i prethodno formiranje erozione jame, iskopavanjem prirodnog materijala, ukoliko bi istaloženi erodovani materijal mogao da izdigne nivo donje vode hidroelektrane, a naknadno uklanjanje istaloženog materijala je otežano ili skupo. Zaštita od potkopavanja fundamenata bučnice moguća je i sa tepihom od komada kamena velike težine (rip-rap zaštita), gabionima, gabionskim tepihom i međusobno povezanim armirano-betonskim elementima.

U literaturi [3] je prikazan postupak za određivanje krupnoće kamena koja zavisi od dubine h_1 i odnosa L_s/a_s ; h_2^*/h_1 i s/h_1 . Krupnoća kamena (d) se menja duž tepiha u granicama od $0.9 h_1$ na početku do $0.1h_1$ na kraju tepiha. Preporučuje se zaštita tepihom od krupnog kamena na dužini od $30 d_2^*$, mereno od kraja bučnice.

3. BUČNICA SA BLOKOVIMA

Blokovi na horizontalnom dnu bučnice su najčešće korišćeni elementi za zadržavanje hidrauličkog skoka u projektovanom prostoru. Korišćenje blokova značajno smanjuje dužinu skoka i drugu spregnutu dubinu (h_2). Lokacija blokova, oblik, veličina i prored su parametri koji određuju strujnu sliku i hidrauličke dimenzije bučnice sa blokovima. Međutim, moguća su kavitaciona oštećenja blokova i okolne betonske površine za velike Frudove brojeve (F_1) ulaznog toka, što može da bude ograničavajući faktor za njihovo korišćenje. Ulazni specifični protok ($m^3/s/m$), ulazni Frudov broj i očekivana učestalost i trajanje korišćenja bazena su glavni elementi koji se moraju uzeti u obzir pri donošenju odluka o postavljanju blokova na dno bučnice. Dosadašnja iskustva pokazuju da se pod izvesnim uslovima, pravilno locirani i dobro dimenzionisani i oblikovani blokovi mogu koristiti i pri $F_1=9$.

Na osnovu rezultata eksperimenata opisanih u [4] zaključeno je da se u prinudnom hidrauličkom skoku sa jednim redom blokova i proredom 50% može formirati

pet regiona sa sledećim tipovima toka, u zavisnosti od međusobnih odnosa konturne sile i hidrostatičkog pritiska ispred bloka (P/F), odnosa L_B/y_2 i odnosa s/y_1 .

Region sa A-skokom: sličan klasičnom skoku; ne javlja se ključanje toka; nizvodno talasanje je normalno i formira se samo jedan skok.

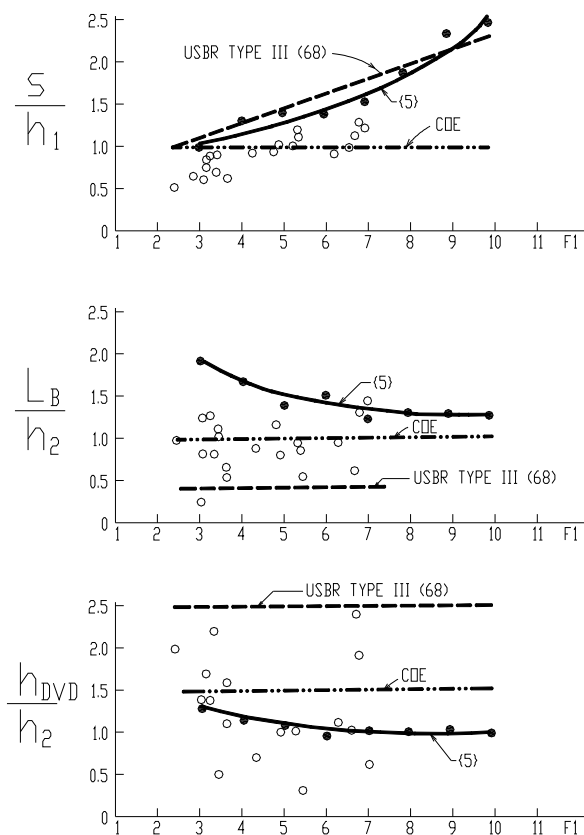
Region sa B-skokom: skok je primoran da se formira jer tok počinje da ključa na nivou višem od nivoa donje vode u blizini reda blokova koji je niži od nivoa h_2^* ; efekat površinskog valjka je veoma izražen, pa je evidentna mala dužina skoka i normalna visina nizvodnih talasa; poniranje mlaza nizvodno nije preveliko ako je dubina toka u tački ključanja veća od dubine h_{dv} za (10-15)%; obrazuje se mali sekundarni skok.

Region sa C-skokom: evidentna je tendencija formiranja sekundarnog hidrauličkog skoka; nivo tačke ključanja je iznad nivoa donje vode za više od (10-15)%; uranjajući mlaz iza tačke ključanja doseže do dna bučnice i odbija se ka površini, povećavajući talasanje nizvodnog toka; rasipanje energije je još uvek prihvatljivo.

Region sa D-skokom: formira se vrlo slabo izražen prinudni skok sa tankim valjkom i pojavom spreja jer je početak skoka veoma blizu prvom redu blokova; uranjanje mlaza je veoma veliko, pa se nizvodno formiraju veliki stojeći talasi ili sekundarni skok velike dužine; skok je veoma blizu da bude odbačen nizvodno.

Region sa talasastim tokom: hidraulički skok se uopšte ne formira, a vodni tok prolazi kroz profil sa blokovima bez značajnog smanjenja brzine toka uz formiranje spreja; nivo donje vode je tako mali da tok nije potopljen.

Ispitivanja [4] su pokazala da svaki region ima neku optimalnu visinu praga ali se, s obzirom na napred opisane oblike strujanja, u praksi preporučuje upotreba skoka tipa B kao najefikasnijeg načina rasipanja energije. Za ovaj tip skoka, optimalne vrednosti $S = s/h_1$, L_s/h_2^* , za $3 \leq F_1 \leq 10$, mogu se odrediti iz dijagrama na slici 2.7. U najvećem broju slučajeva, modelska ispitivanja će potvrditi da bučnice sa geometrijom blokova prema ovim dijagramima imaju najmanju ukupnu dužinu, što, ipak, treba proveriti na hidrauličkom modelu.



Slika 3.1. Optimalna geometrija bloka [5]

U literaturi [6] dati su sledeći analitički izrazi za određivanje optimalne geometrije blokova

$$S_{opt} = 1 + (F_1 - 2)^2/40 \quad 3.1$$

$$(L_B/h_2^*)_{opt} = 1.6 + 7.5 F_1^{-2} \quad 3.2$$

$$C_D = \frac{1}{7} + F_1/100 \quad 3.3$$

$$Y = [2/(1+C_D)^{0.5}] F_1 - 0.5 \quad 3.4$$

Vrednost Y/Y'' je približno konstantna i iznosi 0.87.

Dodatna modelska istraživanja pokazala su da se optimalni učinak bučnice postiže pri jednakim širinama bloka (b_B) i proreda između blokova (e) poredanih samo u jednom redu. U [6] se navodi da drugi red blokova, poredanih jedan iza drugog ili u smaknutom poretku, ne daju značajno povećanje učinka bučnice, ukoliko je $2.5 < l_B/s < 5$, gde je l_B – rastojanje između redova. Međutim, ispitivanja erozije dna na modelu

moгу, pri izvesnim uslovima, da pokažu značajno smanjenje erozije iza bučnice sa dva reda blokova u odnosu na bučnicu sa jednim redom.

Dijagrami na slici 3.1 i jednačine od 3.1 do 3.4 koriste se za $3 \leq F_1 \leq 10$; $0.344 \leq b_B/(b_B+e) \leq 0.649$; $0.3 \leq s/h_1 \leq 9$ i $0 \leq L_B/h_2^* \leq 4$. U navedenim intervalima se uglavnom nalaze svi parametri koji definišu geometriju blokova u bučnicama visokih brana.

Međutim, u praksi je često neophodan kompromis između maksimalnog rasipanja energije i drugih parametara učinka bučnice. U tom slučaju odstupa se od optimalnog položaja i geometrije blokova i traži kompromisan učinak bučnice kao celine. Tako, ako se prag pomeri nizvodno u odnosu na optimalnu vrednost sa ciljem da se smanji mogući učinak kavitacije, smanjuje se učinak rasipanja energije i povećava erozioni učinak nizvodno. Takođe je moguće i suprotno, ukoliko kavitaciona opasnost nije izražena. U vezi sa zadnje iznetim, ističe se da u tehničkoj literaturi nisu prisutna opšte prihvaćena pravila za formiranje bučnice sa blokovima i kompromisnim učinkom.

Napred izneti dijagrami i jednačine su formirani na osnovu ispitivanja jednoređnih blokova sa vertikalnom uzvodnim na nagnutim nizvodnim licem sa širinom krune 0.2s, pa se blokovi takvog oblika i preporučuju za praktičnu primenu.

Suprotno gornjem, u literaturi [3] se preporučuje upotreba blokova trapezastog oblika, postavljenih u dva paralelna red u smaknutom poretku. Navodi se da je trapezoidni oblik blokova otporniji na kavitacione uticaje kao i da se ovakvim dispozicijama blokova (dva reda i smaknuti poredak) znatno ublažava erozija dna rečnog korita nizvodno od bučnice.

Uzvodno lice bloka je u nagibu 1H:4V, a nizvodno u nagibu 1:1. Širina bloka u kruni je jednaka širini praga (b_B), odnos $b_B/e = 2$ i odnos $s/b_B = 1 \div 2.4$. Takođe je preporučeno da se prvi red pragova postavi na udaljenosti od početka skoka $L_B = 3h_2^*$. U gore pomenutoj literaturi je prikazana i procedura za određivanje visine praga (s) i rastojanje između dva reda blokova (l_B).

4. BUČNICA SLOŽENOG OBLIKA

Bučnice samo sa jednim pragom ili samo sa jednim redom blokova retko se sreću kod izgrađenih visokih

brana, posebno onih izgrađenih u skorije vreme. Naime, u najvećem broju izgrađenih bučnica sa prinudnim hidrauličkim skokom koristi se kombinacija više različitih elemenata kao što su blokovi raznih oblika, kontinualni puni pragovi ili kontinualni nazubljeni pragovi, takođe raznih oblika.

Betonski elementi se mogu postavljati na dnu bučnice sa širinom jednakom širini brzotoka, sa naglim ili postepenim povećanjem širine bučnice, bilo da je dno horizontalno ili je u nagibu.

Blokovima postavljenim na kraju brzotoka (chute blocks) tok se cepa u više struja, a struja preko praga se izdiže iznad dna bučnice. Namena blokova je da skrate dužinu skoka i stabilizuje ga. Rezultati nekih modelskih ispitivanja i opažanja na izrađenim objektima ukazuju na njihov relativno mali doprinos stabilizaciji skoka i veliku ugroženost kavitacijom pri velikim brzinama vode preko i oko njih.

Prvenstvena funkcija blokova postavljenih u središnjem delu bučnice (baffle piers) je rasipanje energije toka. Ovi blokovi su veoma efikasno i sigurno sredstvo za rasipanje energije pri relativno malim brzinama vode u profilu neposredno ispred prvog reda blokova. Međutim, ako su ove brzine velike, korišćenje ovog tipa dodatnog rasipanja energije moglo bi da bude neprikladno zbog mogućih kavitacionih oštećenja.

Pragovi mogu da budu postavljeni u središnjem delu bučnice ili na njenom kraju.

Pragovi u središnjem delu bučnice imaju istu namenu kao blokovi. Puni kontinualni pragovi bolje raspoređuju protok nizvodno od njih u odnosu na blokove i manje su izloženi kavitacionim oštećenjima. Obično se koriste kod preliva sa više prelivnih polja i jedinstvenom bučnicom.

Puni ili nazubljeni pragovi se uglavnom postavljaju na nizvodnom kraju betonskog dela bučnice. Osnovna namena im je da dodatno smanje dužinu skoka i ublaže eroziju nizvodnog rečnog dna. Kod velikih bučnica, nizvodni prag je obično nazubljen, čime se povećava difuzija mlaza i smanjuje brzina vode iza praga. Naime, nazubljenim pragom se, usled međusobnog dejstva povratnog toka preko praga i nepromenjenog pravca strujanja vode kroz proreze, formira mala brzina vode pri dnu rečnog korita neposredno iza bučnice. Težnja je da brzina pri dnu bude što bliže nuli za najučestalije protoke jer se sa promenom protoka menja položaj,

veličina i brzina povratnog toka iza punih delova nazubljenog praga. Jedna od korisnih osobina nazubljenog praga je što tok odnosi krupan nanos kroz proreze, koji je dospao u bučnicu na razne načine (ljudski nepar, bočno povratno strujanje kod preliva sa više prelivnih polja i dr.). Ukoliko ne bi bio izbačen iz bučnice, ovaj nanos bi stalno bio u pokretu zbog turbulencije toka, što bi dovelo do visokog stepena abrazije betona (USBR je planirao da manje bučnice na svojim objektima pokrije betonskim pločama sa gornje strane i tako onemogućiti da posetioci ubacuju kamenje u njih).

U praksi je moguć (i izgrađen) veliki broj varijanti bučnica sa prinudnim hidrauličkim skokom u raznim kombinacijama osnovnog oblika bučnice (nagla ili postepena promena širine, horizontalno ili koso dno, pozitivna ili negativna stepenica i dr.) i dodatnih elemenata na dnu.

Veliki broj mogućih kombinacija je uglavnom i razlog što do danas nisu izrađena univerzalna pravila za izbor najekonomičnije varijante, niti razvijen standardni postupak za projektovanje. Izbor konačnog rešenja je još uvek iterativni postupak sa velikim brojem uticajnih faktora (generalna dispozicija i tip brane, tip preliva, merodavan specifični protok, učestalost prelivanja, prihvatljiva erozija nizvodnog rečnog korita, geološke i geomehaničke karakteristike korita, karakteristike donje vode, kavitacioni potencijal toka, mogućnost korišćenja ovazdušenja toka za kontrolu kavitacije, razvoj kavitaciono otpornih polimernih betona, fluktuacione karakteristike toka, iskustvo projektanta), a interval u kome se nalazi konačno rešenje ograničen je samo projektantovom maštom i troškovima izgradnje.

Dole izloženi generalni oblici i dimenzije bučnica, kao i oni izloženi u ostaloj tehničkoj literaturi, moraju se koristiti oprezno jer mogu, ali ne moraju, da budu prikladni za određene specifične situacije.

U.S. Bureau of Reclamation (USBR) je, na osnovu laboratorijskih ispitivanja i analize učinka izgrađenih bučnica, razvio grupu generalizovanih crteža bučnica za više specifičnih situacija. Ovaj rad je ukratko izložen u Monografiji 25 [7].

Prvo izdanje Monografije izašlo je u septembru 1958. godine, a zadnje, osmo, u maju 1984. godine. Prvo izdanje nije prerađivano i dopunjavano u sledećim izdanjima.

Od svih tipova slapišta, prikazanih u ovoj Monografiji, u projektovanju bučnica visokih brana najčešće se primenjuju tipovi II i III.

U bučnici tipa II koriste se blokovi na kraju brzotoka i nazubljeni prag na kraju betonskog dela bučnice. Preporučeno je korišćenje pri $4 < F_1 < 14$ i pri specifičnom protoku do $46,5 \text{ m}^3/\text{s/m}^1$. Primenljiva je pri bilo kom padu dna brzotoka ali za nagibe veće od 2V:1H, koso dno brzotoka i horizontalno dno bučnice treba spojiti kružnom krivinom. Zahteva se pravougaoni poprečni presek bučnice.

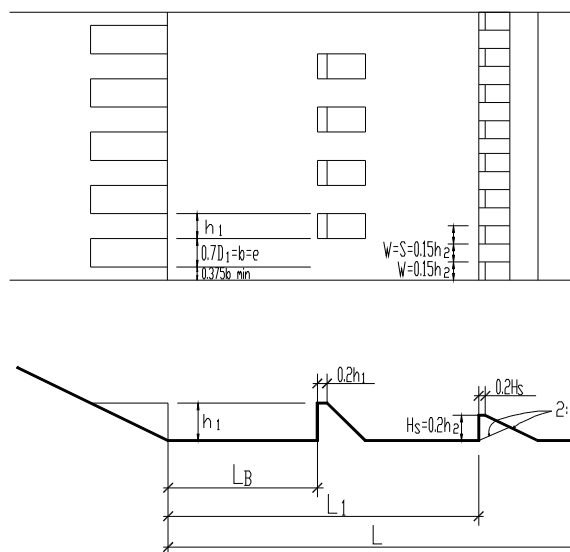
Dodatni elementi za stabilizaciju skoka u bučnici tipa III su blokovi na kraju brzotoka, blokovi na horizontalnom dnu i puni prag na kraju bučnice. Ovaj tip može da se koristi pri $4,5 < F_1 < 17$, a preporučeno je korišćenje do $q = 19 \text{ m}^3/\text{s/m}$ i $V_1 = 18 \text{ m/s}$. Nagnuto dno brzotoka i horizontalno dno bučnice takođe se spaja kružnom krivinom ako je nagib dna brzotoka veći od 2:1. Pravougaoni poprečni presek bučnice je obavezan.

Potrebno je naglasiti da, u okviru ovih modelskih istraživanja, nije ispitivan uticaj tipa bučnice na veličinu erozije nizvodnog rečnog korita. Takođe nije ispitivan spoj bučnice sa prirodnim koritom reke koji najčešće nije jednostavan.

Procedura i pomoćni dijagrami za dimenzionisanje bučnice oba tipa prikazani su u [7].

Kasnije je razrađen još jedan tip USBR bučnice, relativno kratke dužine ($L_s = 3 h_2^*$) sa blokovima na kraju brzotoka, blokovima u središnjem delu u jednom redu i nazubljenim pragom na kraju bučnice [8]. Preporučeno je korišćenje pri $2,5 \leq F_1 \leq 5,6$ (slika 4.1).

Sve tri napred pomenute USBR bučnice sadrže jedan red betonskih blokova na kraju nagnutog dna brzotoka. Međutim, rezultati modelskih ispitivanja, publikovanih u [9], pokazuju da ovi blokovi malo učestvuju u rasanju energije i da je rizik od kavitacije tako veliki da je svrsishodnost njihovog korišćenja kod visokih brana pod sumnjom. Tako, na primer, blokovi na kraju brzotoka brane Pit 6 bili su toliko oštećeni kavitacijom da su uklonjeni u toku rekonstrukcije bučnice ove brane. Ipak, osmatranja na nekim izgrađenim objektima i ispitivanja na hidrauličkom modelu pokazuju da blokovi na kraju brzotoka opstaju neoštećeni i pri brzinama od $25 \text{ m}^3/\text{s}$, pod uslovim da kavitacioni broj ne pada ispod vrednosti 0,5.



Slika 4.1. Šema bučnice prema [8]

U.S. Army Corps of Engineers (USACE) preporučuje bučnicu sa dodatnim elementima u dnu, malo različitu od USBR bučnice [10]. Šema preporučenog tipa bučnice je prikazana na slici 4.2.

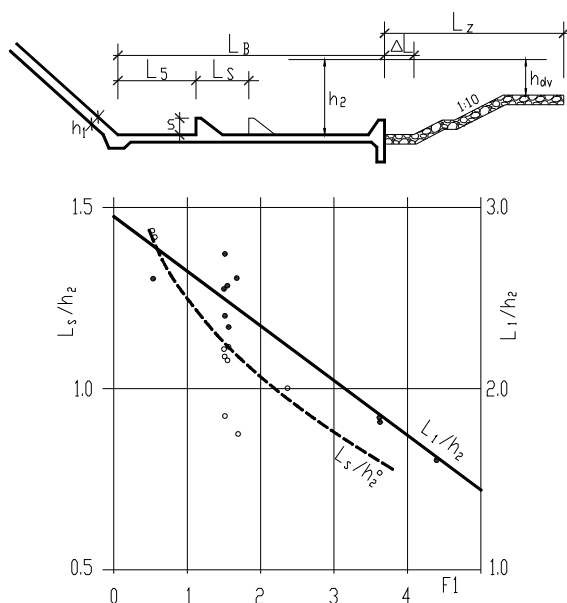
Preporučuje se upotreba ovog tipa bučnice pri $2 \leq F_1 \leq 9$ a u posebnim slučajevima i do $F_1 = 20$.

Bučnica ne sadrži blokove na kraju brzotoka a moguće je da budu izostavljeni i blokovi u središnjem delu bučnice. U tom slučaju ukupna dužina bučnice je

$$L_B = 1.7 h_1 F_1^{1.5} \quad 4.1$$

Ipak, blokovi u središnjem delu bučnice u kombinaciji sa pragom na kraju oblika je najčešće korišćena konfiguracija u praksi.

Upotreba blokova znatno smanjuje dužinu slapišta, dubina h_2 je manja za projektni protok i obezbeđuje stabinost skoka. Oblik bloka, lokacija, veličina, prored, broj redova, visinski položaj dna i ukupna dužina bučnice su osnovni parametri koji definišu konačni geometrijski oblik USACE bučnice. Ako su vrednosti F_1 velike, blokovi i okolne betonske površine mogu da budu kavitaciono oštećeni.



Slika 4.2. Šema bučnice prema [10]

Standardni oblik bloka je trapeznog preseka visine s , sa vertikalnim uzvodnim i kosim nizvodnim licem u nagibu 1:1, dužina u kruni je $0.2s$, a širina (b) upravna na tok je $b=s$.

Udaljenost prvog (uzvodnog) reda blokova od početka bučnice zavisi od vrednosti Frudovog broja F_1 . Kada je $2 \leq F_1 \leq 4.6$ udaljenost je $L_s = 1.5h_2$. U intervalu $4.6 \leq F_1 \leq 9.0$ vrednost L_s se linearno menja od $1.5h_2$ za $F_1 = 4.6$, do $2.0h_2$ za $F_1 = 9.0$. Ukoliko se primenjuje bučnica sa dva reda blokova, uzvodno lice bloka u drugom redu je udaljeno od uzvodnog lica bloka u prvom redu za $L'_s = 2.5s$. Blokovi u drugom redu se postavljaju u smaknutom poretku u odnosu na prvi red blokova. Eksperimenti su pokazali da drugi red blokova značajno smanjuje eroziju rečnog korita nizvodno od bučnice. Prema tome, drugi red blokova treba koristiti samo u slučaju da erozija korita može da izazove dodatne probleme. Maksimalno rastojanje između krajnjih blokova u redu i bočnih zidova je $b/2$ a minimalno određuju izvodačke potrebe.

Visina bloka takođe zavisi od vrednosti F_1 . Za $2 \leq F_1 \leq 4.6$, visina bloka je $s = h_2/6$. U intervalu $4.6 \leq F_1 \leq 9$, vrednost s se linearno povećava od $s = h_1$ za $F_1 = 4.6$, do $s = 1.6h_1$ za $F_1 = 9$. Širina bloka (b) je uglavnom $b = s$ ali je zadovoljavajuće i $b < s$ pod uslovom da je blok konstruktivno stabilan.

Na kraju USACE bučnice se obično postavlja puni prag. Eksperimenti su pokazali da se najmanja erozija nizvodnog dna postiže pri visini praga od $h_1/2$ ili $h_2/12$. Koristi se manja vrednost. Oblik praga ne utiče na učinak bučnice a preporučuje se da uzvodno lice bude u nagibu 1:1 zbog lakšeg iznošenja tvrdih tela iz bučnice.

Povoljniji su vertikalni bočni zidovi bučnice od nagnutih jer se u bučnicama sa nagnutim bočnim zidovima generiše dodatno vrtloženje nizvodno od bučnice. Ukoliko nagnuti bočni zidovi moraju da se koriste iz konstruktivnih razloga, širina bučnice na polivni dubine h_2 mora da bude jednaka širini brzotoka. Krune bočnih zidova treba da su iznad maksimalne kote donje vode jer povratni tok preko krune zidova negativno utiče na učinak bučnice zbog potapanja skoka, povećane turbulencije i povećane erozije nizvodnog rečnog dna.

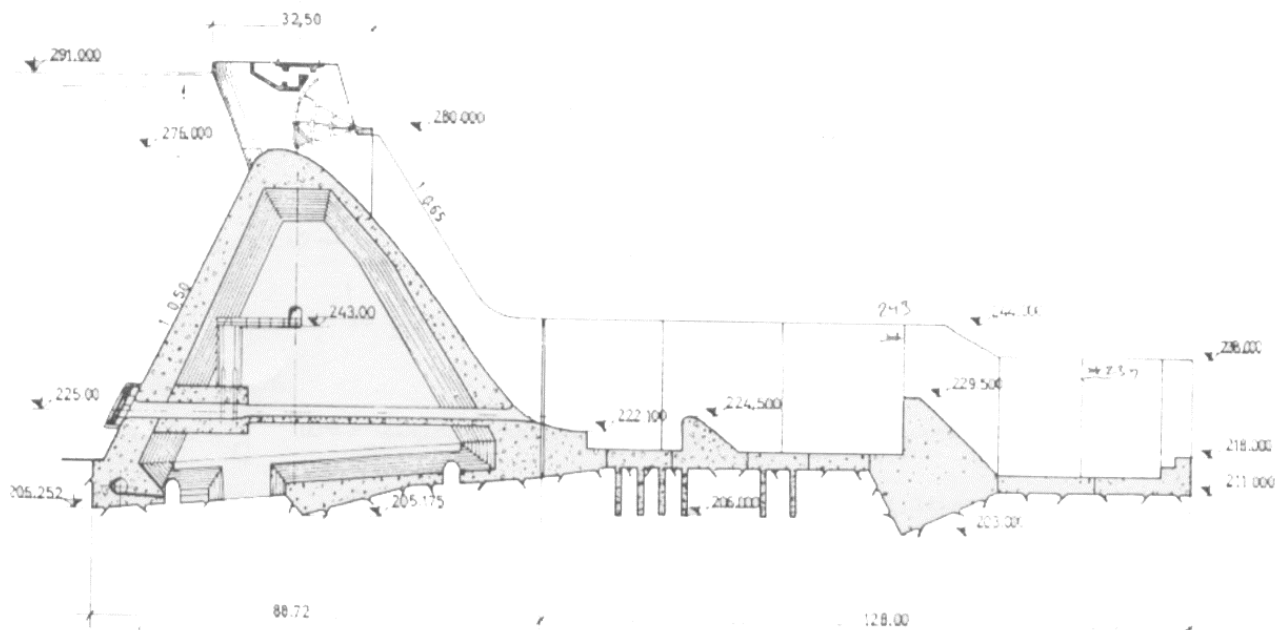
Visinski položaj dna USACE bučnice u odnosu na nivo donje vode određuje dubina h_2 koja se kreće u granicama od $h_2 = 0.8h_2^*$ do $h_2 = h_2^*$. Preporučena je vrednost $h_2 = h_2^*$.

Dužina USACE bučnice sa jednim ili dva reda blokova i završnim pragom bilo kog oblika zavisi od vrednosti h_1 i F_1 i određena je jednačinom

$$L_B = 1.4h_1 F_1^{1.5} \quad 4.2$$

Idealan primer izgrađene bučnice sa složenom geometrijom je bučnica brane Bajina Bašta (slika 4.3).

Brana Bajina Bašta spada u klasu visokih brana sa prelivom velikog kapaciteta, velikog specifičnog protoka i velike učestalosti preliivanja. Visinska razlika između nivoa u jezeru i nivoa vode u bučnici je 51.0 m pri specifičnom protoku od $100.0 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^1$. Iz konstruktivnih i ekonomskih razloga morao je da bude usvojen dvostepeni tip slapišta sa primarnom bučnicom složenog oblika. Elementi primarne bučnice su negativna stepenica na početku bučnice, blokovi u središnjem delu bučnice i visoki prelivni prag na kraju bučnice. Modelska ispitivanja su pokazala da se 70% energije toka rasipa u primarnoj bučnici. Registrovana erozija rečnog korita nizvodno od sekundarne bučnice ne ugrožava stabilnost bučnice i brane. Postrojenje je pušteno u pogon 1967. godine.



Slika 4.3. Bučnica brane Bajina Bašta

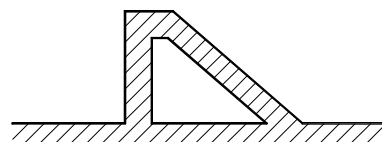
Posle prolaska povodnja u 1992. godini sa velikim i dugotrajnim proticajem, konstatovano je da su polomljena 3 bloka. Uzrok lomu su bile poprečne vibracije blokova izazvane dugotrajnim i velikim fluktuacijama pritiska na bočnim stranama blokova.

Radovi na rehabilitaciji realizovani su iste godine. Zadržani su isti oblici i dimenzije blokova ali je znatno povećana njihova stabilnost pri dejstvu bočnih fluktuirajućih sila. U sledećim godinama su često preivali veliki protoci ali se lomovi blokova nisu ponovili. Kavitaciona oštećenja blokova i nizvodnog praga nisu registrovana tokom celog eksploatacionog perioda. Veruje se da je to posledica velike ovazdušenosti dolazećeg toka i zaobljenosti ivica pragova.

Sem napred iznetih, u tehničkoj literaturi su prikazane brojne procedure za određivanje oblika i dimenzija bučnica sa dodatnim elementima na dnu, uglavnom za Frudove brojeve (F_1) iz intervala $2.5 \leq F_1 \leq 4.5$ i za male padove i protoke. Kratak opis nekoliko predloženih oblika i dimenzija bučnica dat je u [11].

U svim napred prikazanim bučnicama složenog oblika naglašeno je da pouzdano rasipanje energije unutar predviđenog prostora zavisi od sigurnosti blokova u pogonu, uglavnom od njihove otpornosti na kavitaciona oštećenja. Fluktuacije sila na bočnim

stranama bloka takođe mogu da budu uzrok loma blokova (primer su blokovi u bučnicama brana Bajina Bašta i Pit 6) ali se ovaj mogući problem otklanja odgovarajućim ankerisanjem blokova u dno bučnice ili izgradnjom šupljih blokova bez zatvorenih bočnih strana [12] (slika 4.4).



Slika 4.4. Blok sa šupljinom prema [12]

S druge strane, mogućnost pojave kavitacije i kavitacionih oštećenja zavisi od većeg broja parametara kao što su ulazni Frudov broj, udaljenost uzvodnog lica blokova od početka hidrauličkog skoka, brzina vode u profilu blokova, materijala od koga su izgrađeni blokovi, veličine fluktuacija pritiska, dubine donje vode iznad blokova i ovazdušenosti vodnog toka u profilu blokova. Zbog veoma raznovrsnog i neujednačenog uticaja navedenih parametara na pojavu kavitacionih oštećenja, do danas nisu mogla da budu formulisana opšte prihvaćena uputstva za određivanje vrednosti dopuštenih brzina vode i drugih napred navedenih parametara, pa se preporučuje da se ove vrednosti određuju na hidrauličkom modelu za sve

bučnice sa dolaznom brzinom većom od 18 m/s [11]. Naime, praksa je pokazala da oslanjanje projektanta samo na razne univerzalne dijagrame i empirijske formule može da dovede do projektantskih grešaka ili izgradnje nepotrebno skupih objekata za rasipanje energije.

Cilj modelskih ispitivanja je da se, na osnovu merenja pulzacija pritiska, odredi kavitacioni potencijal toka, odnosno izračuna kavitacioni broj za svaku bučnicu posebno. Ukoliko je kavitacioni broj manji od opšte prihvaćene univerzalne vrednosti, određene na osnovu iskustva, blokovi se ne mogu koristiti. U tehničkoj literaturi nema mnogo podataka o dozvoljenom minimalnom kavitacionom broju. U [11] je naveden podatak da su blokovi u izgrađenoj standardnoj USBR bučnici tipa III bili izloženi dolaznim brzinama od 25 m/s, pri kavitacionom broju od 0.33, ali da u toku 30-to godišnjeg eksploatacionog perioda nisu registrovana kavitaciona oštećenja blokova.

Budući da je sigurnost blokova u pogonu najviše ugrožena od kavitacije, nastale usled separacije toka na uglovima i ponovnog dodira mlaza sa stranama blokova, u laboratorijama su ispitivani, a zatim i primenjivani, oblici blokova koji sprečavaju ponovni dodir mlaza sa čvrstom granicom. Zaključeno je da se ovaj cilj može postići pomoću:

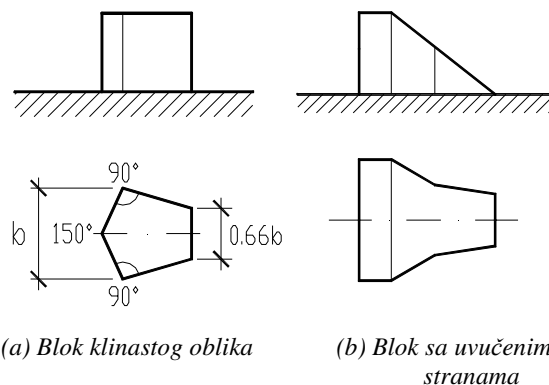
- zaobljavanja uglova kako bi se eliminisala separacija toka,
- oblikovanja čela bloka tako da se separisani tok usmeri koso u odnosu na pravac strujanja,
- uvlačenja bočnih strana bloka ka unutrašnjosti tako da mlaz ne može ponovo da se prilepi uz bočne strane.

Zaobljavanje uglova u razmerama kojima se potpuno sprečava separacija toka, znatno se smanjuje suštinska namena blokova (rasipanje energije usled udara u blokove). Ova mera primenjivana je u ranijim godinama ali je, zbog navedenih nedostataka, ubrzo obustavljena.

Oblicima bloka, koji su ispitivani zadnjih godina, ne teži se da se spreči separacija toka u uglovima već da se eliminiše mogućnost da se mlaz ponovo prilepi uz bočne strane (slika 4.5).

Najpre su ispitivani i predloženi blokovi klinastog oblika sa temenim uglom od 150° . Blokovi ovog oblika izvedeni su u bučnici temelnog ispusta brane Poechos

(Poechos – Peru). Nisu registrovana kavitaciona oštećenja blokova ni pri ulaznim brzinama u bučnicu, većim od 20 m/s.



Slika 4.5. Modifikovani oblici blokova

U literaturi nema podataka o njihovoj primeni u bučnicama još nekih izgrađenih visokih brana.

Takođe je ispitivan i blok sa uvučenim bočnim stranama čime se eliminiše mogućnost da separisani mlaz ponovo dođe u dodir sa bočnim stranama bloka. Ispitivanja na modelu su pokazala da je novi oblik bloka optorniji na kavitacione uticaje od standardnih blokova u USBR bučnicama tipa III. Blokovi sa uvučenim bočnim stranama su izgrađeni u bučnici visoke brane Mangla (Pakistan). Prema modelskim ispitivanjima, u ovoj bučnici može da se javi povremeno spuštanje pritiska do nivoa vodene pare unutar vodnog toka ali u prirodi nisu, do sada, primećeni tragovi kavitacionih oštećenja.

5. SPOJ BUČNICE SA PRIRODNIM REČNIM KORITOM

Sem u nekim neuobičajenim i izuzetnim uslovima, potrebno je da se bučnica spoji sa prirodnim rečnim koritom pomoću posebno oblikovane prelazne donice. Pošto rasipanje energije vodnog toka normalno nije završeno u bučnici, zaostali deo će se rasipati u prelaznoj deonici pa je neophodna njena zaštita od erozije i potkopavanja fundamenata bučnice. Oblik i dimenzije prelazne trase određuju se iz uslova da se izlazne brzine iz bučnice ne povećavaju nizvodno. Dno prelazne deonice se zadržava na nivou dna bučnice na dužini od najmanje 1,5 m, ukoliko je dno bučnice niže od dna prirodnog rečnog korita. Prelaz sa jednog nivoa

na drugi treba da je u nagibu bar 1V:10H, što istovremeno određuje i dužinu tranzitne deonice. U [10] se preporučuje da se mere zaštite od erozije primene na dužini prelazne deonice i na dodatnoj dužini od 10 h₂ nizvodno od njegovog kraja. Poželjan je postepeni prelaz od vertikalnih zidova bučnice na kose strane prelazne deonice.

Naglo povećanje širine prelazne deonice u odnosu na širinu bučnice izaziva pojavu vrtloga sa vertikalnom osom, što povećava erozini potencijal toka a može da se smanji i proticajni profil toka uz prateće negativne posledice. Posebno je problematičan spoj uske bučnice sa širokim rečnim koritom u uslovima istih nivoa dna bučnice i rečnog dna.

6. PRIMENA MATEMATIČKIH MODELA

U ovom radu je na više mesta naglašena neophodnost da se oblik i dimenzije bučnice i njenih komponenata odrede na osnovu odgovarajućih ispitivanja na fizičkom modelu.

Ipak, treba naglasiti da relativno novi i efikasni računarski komercijalni modeli (na primer, CFD model FLOW-3D, ANN modeli NEURAL CONNECTION 2 i MATLAB 5 ili model SPARTACUS) omogućavaju numeričko modeliranje strujanja u bučnici pri različitim dimenzijama i položajima dodatnih elemenata na njenom dnu. Rezultati do sada realizovanih numeričkih modela ove vrste pokazuju prihvatljivo slaganje rezultata numeričkog i hidrauličkog modelisanja ali je potrebno da se poverenje u rezultate numeričkih modela potvrdi i merenjima na izgrađenim bučnicama.

LITERATURA

- [1] Rajaratnam, N., *Hydraulic jump, Vol. 4 & Advances in Hydrosience*, 1967.
- [2] Vischer, D.L., Hager, W.H., *Dam Hydraulics*, John Wiley & sons, 1998.
- [3] Ланно, Д.Д., (editor) *Хидраулички прораčун преливних хидротехничких објеката*, (na ruskom) Энергоатомиздат, 1988.
- [4] Basco, D.R., *Optimized geometry for baffle blocks in Hydraulic jump*, XIV IAHR Congress, Paris, 1971.
- [5] P. Novak (editor), *Developments in Hydraulic Engineering – 2* Elsevier, 1984.
- [6] Vischer, D.L., Hager, W.H., *Energy dissipators*, A.A. Balbena, 1995.
- [7] Peterka, A.J., *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*, Engineering Monograph No. 25, USBR, 1958.
- [8] Georg, R.L., *Low Froude number stilling basin design*, USBR, 1978.
- [9] Suryavanshi, B.D. i dr., *Use of Chute Blocks in Stilling basins – An assessment*, ICOLD XI Congress, 1973.
- [10] USACE, *Hydraulic Design of Stillways*, EM 1110-2-1603, januar 1990.
- [11] Khatsuria, R.M., *Hydraulics of Spillways and Energy Dissipators*, izdavač Marcel Dekker, New York, 2005.
- [12] Nakato, T., *Model tests of hydraulic performance of Pit 6 dam stilling basin*, ASCE, Jul of Hyd. Dn, 102 (HY3), 1976.

APPLICATION OF THE RESULTS OF CONTEMPORARY HYDRAULIC INVESTIGATIONS
IN THE DESIGNS OF SPILLWAYS FOR LARGE DAMS
(Part Three)

by

Živodar ERČIĆ, C.E.
Energoprojekt, Beograd
E-mail: erra@eunet.rs

Summary

The third part of this Report gives a short description of a stilling basin with forced hydraulic jump, the stilling basin being formed by using blocks or sills, or by combining these two basic elements. The results are presented of available model tests and observations on existing structures.. Diagrams and empirical formulae for approximate determination of the dimensions of blocks and sills are included. The impact of cavitation

on the safety of the structural components and on the overall safety of the structures is underlined, as well as the necessity of performing the appropriate hydraulic model investigations,.

Key words: forced hydraulic jump, baffle blocks, baffle piers and end sills.

Redigovano 26.08.2009.