

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

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

REZIME

U drugom delu rada se ukratko opisuju objekti za rasipanje energije, posebno bučnice sa klasičnim i prinudnim hidrauličkim skokom. Izneti su rezultati savremenih istraživanja u vezi sa određivanjem oblika i dimenzije ovih objekata. Predložen je metod za određivanje projektnog protoka prema konceptu projektovanja zasnovanom na učinku. Izneti su osnovni principi za određivanje koncentracije vazduha i koncentracije ukupno rastvorenog gasa u vodi.

Ključne reči: klasičan hidraulički skok, prinudni hidraulički skok, projektni protok, ovazdušenje, rastvaranje gasa

1. UVOD I SADRŽAJ DRUGOG DELA RADA

Kinetička energija vodnog toka na kraju tranzitnog dela preliva visoke brane je obično vrlo velika. Tako bi, na primer, protok preko preliva brane Bajina Bašta, verovatnoće prevazilaženja 0.0001, imao ukupnu snagu od 7000 MW, odnosno specifičnu snagu od 85 MW po jednom metru širine tranzitnog dela preliva.

Rasipanje ove kinetičke energije je suštinski problem pri spajanju toka sa visokom i toka sa niskom kinetičkom energijom, odnosno pri privođenju prelivnih protoka neke visoke brane u nizvodni rečni tok. U hidrotehničkom inženjerstvu se za tu svrhu koriste objekti, poznati pod zajedničkim nazivom „rasipači energije“ (energy dissipators), a upotrebljavaju se na mestima gde bi kinetička energija prelivnih protoka mogla da izazove podlokavanje brane i objekata uz branu, eroziju dna i obala nizvodnog rečnog korita, generaciju velikih talasa u nizvodnom odvodu i dr. U praksi se koriste različiti tipovi objekata za rasipanje energije, a broj raspoloživih varijanti je veći nego za

bilo koju drugu komponentu površinskog preliva (u literaturi [1] se navodi statistički podatak da je na branama u 61 zemlji izgrađeno 370 različitih objekata za rasipanje energije).

Iako je raznovrsnost ovih objekata velika, energija se u njima uglavnom rasipa usled:

- turbulencije i unutrašnjeg trenja u vodnoj masi u zoni velikih gradijenata brzina u kojoj se formiraju vrtlozi;
- difuzije vodnog mlaza u atmosferi i trenja na dodiru voda-vazduh.

Saglasno navedenim mehanizmima, efikasno rasipanje energije se može postići:

- povećanjem turbulencije vodnog toka naglom promenom horizontalnih i vertikalnih dimenzija kanala, prigušenjem, povećanjem rapavosti, udarom mlaza u čvrstu granicu (pragovi, zubi, blokovi, dno rasipača) i sudarom dva mlaza vode;
- kreiranjem proširene turbulentne zone između vode i okružujućeg vazduha elementima za rasticanje vodnog mlaza ili kreiranjem njegovog asimetričnog oblika.

Brojni objekti za koncentrisano rasipanje energije unutar relativno malog prostora mogu se svrstati u klase na bazi:

- hidrauličke akcije (turbulencija, trenje, difuzija);
- načina disipacije: horizontalno (kao u hidrauličkom skoku), vertikalno (kao u odskočnom mlazu) i prostorno;
- geometrije i oblika glavnog toka (naglo proširenje, suženje, suprotno delujući tokovi, sudari i dr.);
- geometrije i oblika objekta u kome se odvija proces rasipanja energije.

U novijoj inostranoj tehničkoj literaturi aktuelan je stav da je najpraktičnije da se rasipači energije podele na klase prema njihovoj geometriji i obliku. Shodno gornjem, završni deo površinskih preliva visokih brana može se svrstati u sledeće tri grupe:

- Objekti sa hidrauličkim skokom (Hydraulic jump stilling basins),
- Objekti sa glatkim ili nazubljenim potopljenim cilindričnim dnom (Roller bucket stilling basins; solid, slotted),
- Nepotopljeni odskoc: sa i bez betonskog bazena u donjoj vodi (Trajectory buckets, plunge pools),

U našoj projektnoj praksi nisu usaglašeni, a često nisu ni definisani, prikladni nazivi za sve vrste objekata za rasipanje energije. Obično se koriste izrazi „slapišta“ i „bučnice“ ali se uglavnom upotrebljavaju kao sinonimi za rasipače sa hidrauličkim skokom. U ovom radu se izraz „slapište“ koristi kao zajednički naziv za sve tipove rasipača (slapište = energy dissipator), dok je naziv „bučnica“ vezan za slapišta sa hidrauličkim skokom i slapišta sa potopljenim cilindričnim dnom.

Izlaganja u ovom, drugom, delu rada ograničena su na bučnice pravougaonog poprečnog preseka sa hidrauličkim skokom. Izneti su karakteristični elementi bučnice sa klasičnim hidrauličkim skokom, sa horizontalnim ili nagnutim dnom, sa naglim ili postepenim proširenjem u osnovi, sa naglim spuštanjem ili izdizanjem dna i sa dodatnim elementima u dnu.

2. KRATKA ISTORIJA HIDRAULIČKOG SKOKA

Premda poznavanje istorije hidrauličkog skoka nema praktičnu vrednost, ona je interesantna zbog, najpre sasvim laganog, a zatim vrlo intenzivnog proučavanja ovog fenomena.

Iako se hidraulički skok formira na vodotocima od kako su se oni pojavili na zemlji, najstariji sačuvan grafički prikaz skoka izradio je Leonardno Da Vinči početkom 16. veka, ali sâm fenomen on nije detaljnije analizirao. Najstariju sačuvanu knjigu sa slikom i grafičkim prikazom poprečnog preseka hidrauličkog skoka napisao je Guglielmini 1739. godine. O skoku, kao korisnom sredstvu za naglu promenu dubine vodnog toka, pisao je i Venturu 1797. godine. Prve opsežne analize hidrauličkog skoka izvršio je italijanski profesor G. Bidone 1820. godine, zbog čega se u Italiji hidraulički skok naziva „Bidoneov skok“. Bidone je

pokušao da izvede jednačinu skoka ali je rezultat bio netačan, jer je u analizu uveo pogrešne pretpostavke. Francuski profesor Belanger je u svojoj knjizi, izdatoj 1828. godine, prvi postavio osnove za proračun hidrauličkog skoka. Značajan doprinos u izučavanju ovog fenomena dali su zatim J. Belanger (1849), J. Bress (1860), Bazin u Darcy (1865) i Bussinesq (1870). Eksperimentalne studije u hidrauličkim laboratorijama u USA počele su 1887. godine, a prve praktične rezultate na osnovu eksperimenata objavio je S. Woodward 1915. godine. Usledila su brojna eksperimentalna istraživanja u mnogim hidrauličkim laboratorijama i na izgrađenim objektima sa različitim obuhvatom, zavisno od postavljenih ciljeva. Jedan deo istraživača usmerio je svoj rad na praktično korišćenje fenomena, odnosno na određivanje ekonomski najpovoljnijih objekata za rasipanje energije i utvrđivanje njihovih generalnih dimenzija, izostavljajući istraživanja unutrašnje strukture skoka. Drugi deo istraživača je prvenstveno izučavao unutrašnji mehanizam skoka i njegove uzroke, ne obazirući se na praktičnu vrednost svojih istraživanja.

Dalji progres u upoznavanju i korišćenju hidrauličkog skoka bio je relativno brz. Koncept spregnutih (konjugovanih) dubina je konačno prihvaćen 1932. godine, a generalne bezdimenzionalne karakteristike skoka u zavisnosti od „parametra kinetičke energije toka“ (ekvivalent Frudovom broju) utvrđene su 1936. godine.

Krajem pedesetih i sredinom šezdesetih godina prošlog veka istraživane su i utvrđene turbulentne karakteristike hidrauličkog skoka, a u istom vremenskom periodu realizovana su prva obimna istraživanja fluktuacije pritiska na čvrstoj granici ispod hidrauličkog skoka u ruskim hidrauličkim laboratorijama. Treba istaći da su srpski istraživački među prvima u svetu istraživali ovu pojavu, fundamentalnu u analizi konstruktivne stabilnosti betonske obloge umirujućih bazena (G. Hajdin, J. Muškatirović, A. Špoljančić, D. Arandelović, M. Ivetić i dr.).

U periodu od 1950. do 1960. godine u Birou za melioracije SAD (US Bureau of Reclamation – USBR) je realizovan obiman istraživački program sa ciljem da se odrede standardni hidraulički objekti za rasipanje energije. Proizvod tog programa je poznata Monografija No. 25 (Engineering monograph No. 25; „Hydraulic design of stilling Basins and Energy Dissipators) koja se i danas koristi u projektovanju završnih objekata preliva visokih brana.

Prvi računarski modeli hidrauličkog skoka pojavili su se 1975. godine, a opis skoka po modelu „slojeva smicanja“ (shear layers) prikazan je 1978., a detaljnije razrađivan do 1989. godine.

Uvlačenje vazduha u hidraulički skok privuklo je pažnju istraživača tek na početku druge polovine prošlog veka. Ova važna osobina hidrauličkog skoka najpre je ispitivana u funkciji ukupne količine uvučenog vazduha (1962., 1974.). Rezultati ispitivanja iz 1972. god. prvi put pokazuju da su proces uvlačenja vazduha, promena količine kretanja i rasipanje energije u skoku veoma zavisni od karakteristike toka na početku skoka. Godine 1995. su ustanovljene osobine mešavine voda-vazduh u parcijalno razvijenom hidrauličkom skoku. U 2000-oj godini ispitivani su i determinisani: vertikalna distribucija vazdušne frakcije, frekvencija pronosa mehura kroz profile i brzina mešavine voda-vazduh u smičućem sloju i regionu valjka pri relativno velikim ulaznim Frudovim brojevima. Detaljna ispitivanja osobina toka mešavine voda-vazduh pri malim ulaznim Frudovim brojevima realizovana su 2005. godine. I pored brojnih dosadašnjih studija još uvek nije potpuno razjašnjen proces difuzije mehura vazduha i mehanizmi promene količine kretanja u hidrauličkom skoku, pa su u tom smeru neophodna dalja istraživanja.

Još jedna važna osobina hidrauličkog skoka su njegove oscilatorne karakteristike. Iako su neke od oscilatornih karakteristika zapažene još 1942. godine, a zatim primećene u mnogim eksperimentalnim uslovima, samo je mali broj autora pominjao ovaj fenomen u literaturi. Tek 1995. godine, a zatim još detaljnije 1999. godine, istraživane su sledeće oscilatorne karakteristike skoka: promena od jednog u drugi tip skoka (1); horizontalno kretanje početka skoka (2); varijacije komponenata brzine i pritiska u regionu u blizini valjka (3) i proces formiranja, razvoja i spajanja struktura toka velike razmere (4). Rezultati ovih eksperimenata pokazuju da, pod izvesnim uslovima, oscilira tip skoka i fluktuiraju njegov početak, pri čemu je moguće odrediti periode fenomena.

Istorija skoka, a posebno protekli stogodišnji period njegovog korišćenja, mogli bi navesti na misao da su već otkrivene sve tajne ovog fenomena. Ipak, najnovija istraživanja pokazuju da bi takav zaključak bio pogrešan, jer novi pogled na strukturu turbulentnog smičućeg toka ukazuje na potrebu razdvajanja slučajnog od neslučajnog procesa, što će znatno doprineti boljem razumevanju ovog fenomena.

3. OSNOVNE KARAKTERISTIKE HIDRAULIČKOG SKOKA U BUČNICI

3.1 Definicije, tipovi i parametri

Hidraulički skok u bučnici je nagli prelaz iz burnog toka sa velikom brzinom u mirni tok sa malom brzinom kretanja vode. Istaknute karakteristike hidrauličkog skoka su naglo povećanje nivoa slobodne površine vode, veoma razvijena turbulencija, velika disipacija energije, vrlo efikasno uvlačenje vazduha na početku skoka, odvazdušavanje toka na kraju skoka, generacija spreja i zvuka, fluktuacija pritiska i brzine unutar skoka, erozioni potencijal, kavitacioni potencijal, generacija talasa u donjoj vodi, i pod izvesnim uslovima, oscilatorna promena tipa skoka i fluktuacija početka skoka.

Na prvi pogled, rasipanje energije pomoću hidrauličkog skoka izgleda veoma privlačno rešenje. Skok se može organizovati unutar ograničene i relativno male zapremine čije su dimenzije teoretski jasno definisane. Takođe je teoretski poznata i energija toka na kraju hidrauličkog skoka. Ali, skok je veoma osetljiv i njegovo zadržavanje u određenom prostoru zavisi od nivoa donje vode, promenljivog sa protokom. Degradacija rečnog korita nizvodno od bučnice takođe može dovesti do spuštavanja nivoa donje vode, tako da bučnica koja je na početku funkcionisala zadovoljavajuće, prestane da funkcioniše pravilno, a skok se formira nizvodno od za to predviđenog prostora. Ovaj neželjeni događaj može se sprečiti promenom geometrije dna i/ili bočnih zidova bučnice. Saglasno sa navedenim, u sadržaju ovog rada su sledeći tipovi bučnica:

- sa klasičnim hidrauličkim skokom
- sa horizontalnim dnom spuštenim ispod dna rečnog korita
- sa nagnutim dnom
- sa naglim ili postepenim proširenjem u osnovi
- sa naglim spuštanjem ili izdizanjem dna i
- sa dodatnim elementima u dnu.

Izbor tipa bučnice zavisi od većeg broja parametara, a najuticajniji su: (1) prilazni hidraulički uslovi (brzina, prilazni Frudov broj, ovazdušenost prilaznog toka); (2) specifični merodavni protok i učestalost pojave; (3) tip brane i brzotoka; (4) vertikalni ugao pod kojim vodni mlaz dotiče do dna brzotoka; (5) prihvatljivi erozioni potencijal na izlazu iz bučnice; (6) geološke i geomehaničke karakteristike tla na izlazu iz bučnice; (7) karakteristike donje vode; (8) kavitacioni potencijal toka i (9) troškovi izgradnje.

U praksi je često prisutna i naklonost projektanta nekom tipu bučnice što je prihvatljivo samo u slučaju kada je moguća primena više od jednog tipa, istih učinaka i približno istih troškova izgradnje.

Hidrauličke dimenzije svakog od navedenih tipova bučnice su jasno definisane u hidrauličkoj literaturi, a takođe i njihov učinak. Ono što još nije dovoljno ispitano i standardizovano jesu pulzacije pritiska i vibracije kao posledica velike turbulencije toka unutar bučnice. Zbog toga su problemi na koje se nailazi u toku projektovanja ovih objekata više konstruktivne nego hidrauličke prirode.

3.2. Karakteristike hidrauličkog skoka

Hidrauličke i konstruktivne karakteristike bučnice uglavnom određuju sledeće karakteristike hidrauličkog skoka:

- tip bučnice
- druga spregnuta dubina
- dužina skoka i dužina valjka
- gubitak energije
- turbulentne karakteristike
- uvlačenje vazduha u skok i
- koncentracija ukupno rastvorenog gasa

Pod nekim uslovima ispoljavaju se oscilatorne osobine skoka (periodična promena tipa skoka i horizontalno pomeranje početka skoka) koje mogu da utiču na dimenzije bučnice, posebno na njenu dužinu.

U ovom poglavlju okvirno su izneti rezultati dosadašnjih istraživanja u vezi sa uvlačenjem vazduha u skok, koncentracijom ukupno rastvorenog gasa nizvodno od brzotoka i oscilatornim osobinama skoka.

Geometrijske karakteristike raznih tipova bučnica kao i odgovarajuće raspianje energije u njima prikazani su u sledećim poglavljima.

Turbulentne karakteristike toka u bučnici bice prikazane u sledećem, trećem delu ovog rada.

3.2.1. Uvlačenje vazduha u hidraulički skok

Hidraulički skok uvlači znatne količine vazduha iz atmosfere u vodni tok. Rasipanje uvučenih paketa vazduha u recirkulacionom regionu skoka (valjku) znatno pojačava turbulentni karakter toka i aktivno utiče na povećanje rasipanja energije u bučnici. Opatima je ustanovljeno da je uticaj uvučenog vazduha u skok

veliki pri velikim prilaznim Frudovim brojevima a zanemarljivo mali za vrednosti Frudovih brojeva oko 2.

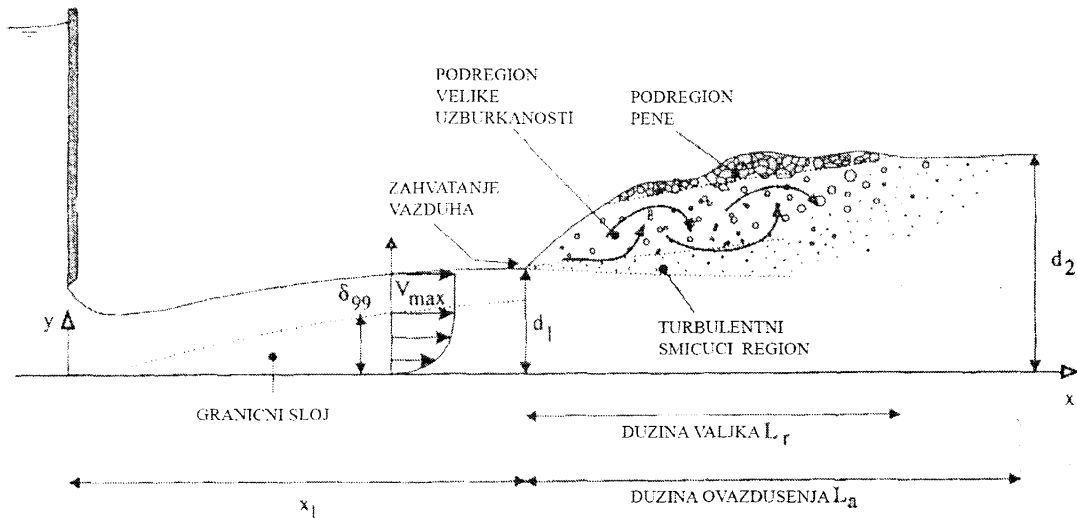
Količina uvučenog vazduha, tj. parametar Q_a/Q_w je bitan za procenu nadimanja toka, odnosno za određivanje kote krune bočnih zidova bučnice. Neka vizuelna zapažanja sugerišu da bi maksimalna visina skoka u recirkulacionom regionu mogla da bude za (10-20)% veća od druge spregnute dubine, zavisno od veličine prilaznog Frudovog broja.

Raspodela koncentracije vazduha po dubini toka, odnosno parametar C_B kojim se definiše koncentracija vazduha u graničnom sloju, je drugi bitan pokazatelj ovazdušenosti toka u bučnici. Naime, dovoljna koncentracija vazduha u graničnom sloju sprečava ili, bar, ublažava kavitaciona oštećenja dna, blokova i pragova koja nastaju usled depresija fluktuirajućeg pritiska u bučnici.

Ispitivanja na hidrauličkim modelima ukazuju da se u mešavini voda-vazduh u bučnici mogu razdvojiti dva glavna regiona sa značajno različitim svojstvima: (1) turbulentni smičući region (turbulent shear region) i (2) valjak (recirculation region), u kome se odbija neustaljeno obrnuto kružno kretanje toka.

U drugom regionu se mogu razdvojiti dva podregiona: podregion velike uzburkanosti (boiling flow sub-region) karakterističan po razvoju vrtloga velikih razmera i formiranju velikih mehura i paketa vazduha i podregion pene (foam layer) sa velikim skupinama mehura vazduha međusobno razdvojenih tankim omotačema od vode (slika 3.1).

Uvlačenje vazduha u hidraulički skok počinje u tački susreta prilaznog toka i valjka, tj. na početku hidrauličkog skoka koji postojano fluktuiru oko nekog srednjeg položaja. Mehure i pakete vazduha uvlače vrtlozi sa horizontalnom osom upravnom na pravac toka koji se formiraju tokom susretanja dolazećeg mlaza vode sa vodenom masom u bučnici. Uvučene mehure i pakete vazduha tok odvlači u turbulentni smičući region (turbulent shear region), karakterističan po intenzivnoj turbulenciji, u kome se mehure i paketi vazduha raspadaju u male mehuriće. Kada mehurići vazduha doplove u nizvodne zone sa malim smičućim naponima, nastaje spajanje mehurića u veće zajednice vazduha (mehure, paket) koji pod uticajem potisne sile odlaze u region valjka ili u atmosferu. Dešava se i značajan broj izbačaja mešavine voda – vazduh iznad prosečne slobodne površine valjka koji se brzo ponovo prikljuuju valjku i još više povećavaju njegovo nadimanje.



Slika 3.1. Regioni u klasičnom hidrauličkom skoku [2]

Količina uvučenog vazduha u skok i distribucija mehurića veoma zavisi od karakteristika dolazećeg toka. Za hidraulički skok u kanalu pravougaonog poprečnog preseka sa horizontalnim dnom razlikuju se tri tipa dotoka: (1) parcijalno razvijen tok sa razvijajućim graničnim slojem i kvazi potencijalnim jezgrom iznad, (2) potpuno razvijen granični sloj po celoj dubini toka i (3) prethodno ovazdušen tok sa potpuno razvijenim graničnim slojem i sa ovazdušenom slobodnom površinom. Prva dva slučaja su moguća samo ako je dužina prilaznog toka dovoljno kratka. Za bučnice na kraju tranzitnog dela preliva visokih brana prilazni tok je skoro po pravilu sa ovazdušenom slobodnom površinom. Generalno, za hidraulički skok sa potpuno razvijenim graničnim slojem u prilaznom toku (slučaj 2) količina uvučenog vazduha je veća nego za slučaj (1). Međutim, parcijalno razvijen tok sadrži veću koncentraciju vazduha pri dnu. U prethodno prirodno ovazdušenom toku distribucija vazduha po dubini toka je uniformnija od distribucije u toku sa potpuno razvijenim graničnim slojem.

U literaturi [12] prikazane su sledeće jednačine na osnovu kojih se može proceniti ukupna količina vazduha uvučenog u hidraulički skok:

$$\beta = \frac{q_a}{q_w} = 0.18 [F_1 - 1]^{1.245} \quad (3.1)$$

$$\beta = 5 \times 10^{-3} F_1^2 \quad (3.2)$$

gde su:

q_a , q_w – specifični protoci vazduha, odnosno vode ($m^3/sec/m$)

Obe gornje formule važe za $2.5 < F_1 < 9$.

Evidentno je rasipanje eksperimentalnih tačaka (β , F_1) na osnovu kojih su izvedene gornje formule kao i znatna odstupanja vrednosti β za velike vrednosti F_1 . Ovo ukazuje na izvestan stepen neopuzdanosti pri proceni vrednosti q_a , odnosno na potrebu dodatnih istraživanja.

Ispitivanja raspodele koncentracije vazduha i raspodele brzina u vertikalnim preseccima klasičnog hidrauličkog skoka uglavnom su se ograničavala na advektivno-difuzni region (turbulentni smičući region) i gornji region valjka i to pri delimično razvijenom prilaznom toku. Rezultati ispitivanja su detaljno prikazani u radovima [2], [13], [14] i [15]. Šema hidrauličkog skoka sa delimično razvijenim prilaznim tokom prikazana je na slici 3.1. Šema raspodele koncentracije vazduha i brzine data je na slici 3.2.



Slika 3.2. Sema raspodele koncentracije vazduha i brzine

U radu [2] ustanovljeni su sledeći empirijski odnosi pri delimično razvijenom dotoku pri $F_1 = 2.89$ i 8.04 ::

$$C = C_{max} \exp \langle 1 - [0.8063(y - y_{cmax}) / \Delta Y_{85\%}]^2 \rangle \quad (3.3)$$

Koncentracija eksponencijalno opada nizvodno prema odnosu

$$\frac{C_{max}}{(C_{max})_1} = [1 - (x - x_1)L_a]^{1.993 F_1 - 6.083} \quad (3.4)$$

Maksimalna koncentracija na početku skoka je:

$$(C_{max}) = 0.143 (V_1 - 0.21) \quad (3.5)$$

Dužina ovazdušenog dela skoka je:

$$L_a / h_2 = 3.5 \sqrt{F - 1.5} \quad (3.6)$$

$$(y_{Cmax} - h_1) / (h_2 - h_1) = 1.101(x - x_1) / L_a \quad (3.7)$$

$$\Delta Y_{85\%} / h_1 = 0.7435(x - x_1) / h_1 + 0.324 \quad (3.8)$$

U ostalim navedenim radovima prikazuju se rezultati ispitivanja na većem broju uzoraka i većem intervalu promene F_1 . Prikazane su raspodele koncentracije vazduha u advektivno-difuznom regionu i gornjem regionu valjka.

(a) Advektivno-difuzni region

$$C = C_{max} \exp \left\{ - \left[\frac{v_1 h_1}{4 D_1} \right] \left[\frac{y}{h_1} - \frac{Y_{Cmax}}{h_1} - \frac{Y_{Cmax}}{h_1} \right]^2 / \left[(x - x_1) / h_1 \right] \right\} \quad (3.9)$$

Jednačina važi za $(y / Y_{sh}) \leq 1$

U gornjoj jednačini je:

V_1, h_1 - brzina i dubina vode na početku skoka
 h, y - horizontalne i vertikalne udaljenosti u koordinacionom sistemu na slici 3.1
 D_1 - turbulentna difuznost
 Y_{sh} - gornja granica advektivno-difuznog regiona

$$(Y_{sh} / h_1) = 1 + 0.199 [(x - x_1) / h_1] \quad (3.10)$$

$$(Y_{Cmax} / h_1) = 1 + 0.108 [(x - x_1) / h_1] \quad (3.11)$$

Jednačine 3.10 i 3.11 važe za $(x - x_1) h_1 \leq 28.7$

(b) Region valjka

$$C = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left[\frac{1}{2} \sqrt{V_1 / D_1} (y - Y_{50}) / \sqrt{(x - x_1)} \right] \right\} \quad (3.12)$$

gde je:

$\operatorname{erf}(u)$ - Gausova funkcija greške

U jednačini (3.12), parametar D_1 - karakteriše difuzioni proces mehura vazduha u gornjoj slobodnoj površini vode, a u jednačini (3.9), parametar D_1 opisuje advektivno-difuzni proces u smičućem sloju voda-vazduh. Veličine oba parametra još nisu standardizovane, a u navedenim radovima određene su na osnovu prilagođavanja jednačina (3.9) i (3.12) eksperimentalnim podacima.

U hidrauličkim skokovima sa potpuno razvijenim ili predhodno ovazdusenim dolaznim tokom, distribucije koncentracije vazduha su različite u odnosu na skokove sa delimično razvijenim dolaznim tokom [2].

Rezultati istraživanja raznih autora u vezi sa raspodelom brzina u vertikalnim presecima duž hidrauličkog skoka detaljno su prikazani u radu [13].

Prema zaključcima u radu [14], dosadašnje studije o uvlačenju i transportu vazduha nizvodno pokazuju da hidraulički skok ostaje i dalje nedovoljno razumljiv dvofazni tok sa komplikovanom strukturom strujanja mešavine voda-vazduh i velikim međusobno zavisnim uticajima uvučenog vazduha i strukture vrtloga.

S projektantske tačke gledišta posebno nedostaju parametri kojima se definiše količina i raspodela vazduha za razne tipove skokova, formiranih u bučnicama koje se najčešće koriste u praksi.

3.2.2 Koncentracija ukupno rastvorenog gasa u bučnici i donjoj vodi

Ustaljeni procenat ukupno rastvorenog gasa (Total dissolved gas – TDG) u reci biće u ravnoteži sa atmosferskim pritiskom sve dok ravnotežu ne poremeti neki događaj, kao što je pojava organskih materija u toku ili ovazdušenog vodnog toka. Drugi slučaj se po pravilu javlja pri strujanju vode u brzotoku i bučnici površinskog preliva visoke brane, a moguća posledica ove pojave je prezasićenost rečnog toka nizvodno od bučnice ukupno rastvorenim gasom, posebno azotom. Povećani nivo prezasićenosti vode gasom je zapažen u prirodi i registrovan kao negativan efekat izgrađene brane na okolinu. Posebno je štetan po riblju populaciju, ukoliko ona mora da pređe iz donje u gornju vodu akumulacije. Na nekim rekama u svetu ovo je najozbiljniji ekološki problem, pa se nivo koncentracije TDG u vodi stalno osmatra i, po potrebi, preduzimaju se mere za sprečavanje štetnih posledica. USEPA (United States Environmental Protection Agency) je, 1986. godine, ustanovila standard za maksimalnu dozvoljenu zasićenost vode potpuno rastvorenim gasom od 110%. Shodno ovom standardu, na svim rekama u USA na kojima je ova pojava bitna, prelivi brana moraju da budu projektovani (ili rekonstruisani) tako da nivo zasićenosti rečnog toka nizvodno od bučnice ne pređe gore navedeni standard.

U našoj zemlji ova pojava nije zabeležena kao problem (na našim branama nema ribljih staza) pa se i ne vrše odgovarajuća sistematska merenja zasićenosti rečnog toka gasom, niti se pojava uzima u obzir pri projektovanju preliva i slapišta.

Ipak, u ovom radu je ukratko prikazan mehanizam rastvaranja gasa u vodi kao i metode na osnovu kojih se

može prognozirati koncentracija rastvorenog gasa u vodnom toku nizvodno od završetka brzotoka.

Mehanizam rastvaranja gasa u vodi je teoretski prilično jednostavan. Naime, aerisani vodni tok iz brzotoka uvlači u vodnu masu u bučnici mehure vazduha koje je doneo sa sobom kao i one koji se formiraju pri uranjanju dolaznog toka u vodnu masu. Mali mnogobrojni mehurići sa vazduhom, nastali pod dejstvom turbulentnih smičućih napona, formiraju u bučnici region sa vrlo velikom površinom dodira između vazduha u mehurićima i okolne vode. Mehuri vazduha u ovom regionu izloženi su povećanom hidrostatičkom pritisku u dubokim bučnicama zbog čega ispuštaju u vodu svoju sadržinu (uglavnom kiseonik i azot) koja se rastvara u vodi. Povećana zasićenost vode ukupno rastvorenim gasom (TDG) iznad standardnih vrednosti može da izazove štetne posledice. Ali, ono što u opisanom mehanizmu nije jednostavno, jeste određivanje najuticajnijih faktora na količinu rastvorenog gasa, kao što su turbulentni nivo u hidrauličkom skoku, veličine mehura ispunjenih vazduhom, njihova raspodela u trodimenzionalnom prostoru bučnice i donje vode, povećana površina dodira između vode i vazduha, vreme zadržavanja mehura u hidrauličkom skoku i povećani hidrostatički pritisak. U ovom procesu, prelaz (transfer) atmosferskog gasa u vodu kontroliše vodna faza u mešavini voda – vazduh. Transfer mase gasa kroz dodirnu površinu između vode i vazduha obično se procenjuje pomoću izraza

$$\frac{d}{dt} C_g = Ka(C_s - C_g) \quad (3.13)$$

gde su:

K – složeni koeficijent transfera mase

C_s – ravnotežna koncentracija TDG u vodi

C_g – koncentracija TDG u vodi

a – jedinična površina dodira vode – vazduh

Najveći uticaj u procesu transfera gasa ima gradijent koncentracije. Kada je C_s veće od C_g gas će se rastvarati u vodi, a kada je C_g veće od C_s gas će se izlučivati iz vode.

Metode na osnovu kojih se procenjuje (predviđa) koncentracija TDG u vodi mogu se podeliti na empirijske i numeričke metode.

U literaturi su se najpre pojavili izrazi za procenu koncentracije gasa, zasnovani na eksperimentalnoj korelaciji zapremine TDG sa nekim parametrom toka, obično sa protokom, pri čemu su obično koeficijenti u

izrazima korelisani sa terenskim merenjima. Međutim, ova merenja su po pravilu realizovana za određene objekte i pod specifičnim hidrauličkim uslovima. Primena ovih empirijskih izraza na druge objekte ili ekstrapolirana na druge hidrauličke uslove nisu dala pouzdano predviđanje nizvodne koncentracije TDG, što je posledica nepotpunog modeliranja fizičkog procesa, tj. karakteristika toka mešavine voda-vazduh i efekata turbulencije koji su promenljivi od slučaja do slučaja.

Numerički modeli novije generacije uzimaju u obzir da je strujanje u bučnici dvofazno, da je najvažniji izvor TDG transferisani gas iz mehura vazduha uvučenih u vodu i da je transfer gasa iz mehura u vodu proces koji povezuje hidrodinamički proces i proces razmene mase.

U nekim numeričkim modelima se koristi simulacija hidrodinamičkog procesa na fizičkom modelu ali se, za simulaciju turbulentnog strujanja, u većini publikovanih numeričkih modela koristi RANS sa k-ε ili k-w modelom.

U radu [2] prikazan je model za procenu transfera gasa zasnovan na integraciji jednačine 3.10. Rezultat integracije je sledeći izraz za specifični deficit (deficit ratio)

$$r = \exp(Kat) \quad (3.14)$$

gde je:

t – vreme zadržavanja mehura u skoku

$r = (C_S - C_{US}) / (C_S - C_{DS})$ - specifični deficit

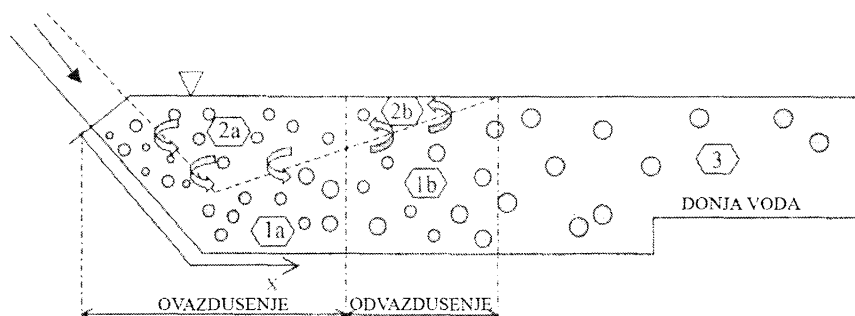
C_{US} , C_{DS} – uzvodna i nizvodna koncentracija rastvorenog gasa (kg/m^3)

C_S – uravnotežena koncentracija gasa u bučnici

U istom radu prikazani su i izrazi na osnovu kojih se može odrediti veličina jedinične površine (a), vreme zadržavanja (t), veličina mehura i dužina aerisanog dela skoka. Uvodeći ove vrednosti u jednačinu 3.14 može se približno proceniti koncentracija TDG u hidrauličkom skoku sa parcijalno razvijenim prilaznim tokom.

U radu [2] su takođe prikazani i rezultati istraživanja na hidrauličkom modelu nekoliko autora na osnovu kojih se može odrediti koncentracija TDG nizvodno od bučnice.

Numerički model zasnovan na simulaciji fizičkog procesa transfera gasa prikazan je u radu [3]. Model je jednodimenzionalan sa odgovarajućim ustaljenim strujanjem u bučnici. Proračunava se koncentracija TDG duž bučnice i donje vode. Analizira se transfer gasa unutar tri regiona (slika 3.3): region uranjanja dolazećeg toka (region 1); region valjka (region 2) i donja voda (region 3). Svaki region ima različite hidrodinamičke karakteristike koje se menjaju duž skoka.



Slika 3.3. Tri regiona transfera prema radu [3]

Transfer gasa je simuliran kroz obe dodirne površine: između mehura vazduha i vode koja ih okružuje (transfer iz mehura) i između slobodne površine vode i atmosfere (površinski transfer). U regionu 1 je najveći transfer iz mehura zbog velikih sila smicanja, velike koncentracije vazduha i velikih hidrostatičkih pritisaka. U regionu 1 nema površinskog transfera jer ovaj region nije u kontaktu sa atmosferom. U druga dva regiona prisutna su oba vida transfera. Koncentracija TDG se

određuje za svaki inkrement pomoću jednodimenzionalne jednačine za transfer mase za nestišljivi fluid.

$$\frac{\Delta(UC)}{\Delta x} = (K_L \cdot a)_{mb} (C_S - C) + (K_L \cdot a)_{SUR} (100 - C) + \frac{V_i}{h} (Cm) \quad (3.15)$$

gde je:

C – koncentracija TDG

C_w -	ravnotežna koncentracija u stanju zasićenosti na dodirnoj površini mehur-voda, uzimajući u obzir hidrostatički pritisak
U -	srednja brzina u proračunskom koraku
Δx -	inkrement proračuna
$(K_L \cdot a)_{bub}$, $(K_L \cdot a)_{sur}$ -	koeficijenti transfera
C_m -	koncentracija TDG koji ulazi u region
V_i -	brzina mešavine pri ulasku u region
h -	visina regiona u kome se analizira uvlačenje vazduha

Jednačina 3.15 se rešava metodom konačnih razlika sa inkrementom od Δx kroz sva tri regiona. Međusobni uticaj regiona 1 i 2 zahteva interaciju zbog uvucenog vazduha prilazecim tokom i odvazdusavanja sve dok se ne postigne željena konvergencija. Granične uslove određuje prethodni inkrement. Početni uslovi su koncentracija vazduha u dolazećem toku i koncentracija stvorena pri dodiru dolazećeg toka i vodnog tela. Koeficijenti transfera mase određuju se na osnovu formule koja je prikazana u radu. Koeficijenti $(K_L a)_{bub(sur)}$ zavise od vrednosti Veberovog broja, Frudovog broja za turbulenciju i tri konstante koje se određuju na osnovu istraživanja na fizičkom modelu.

U radu [4] je opisan trodimenzionalni numerički model za predviđanje koncentracije TDG nizvodno od preliva. Model se sastoji od dva modula: za hidrodinamičku simulaciju i za simulaciju produkcije i transporta TDG. Za potpunu trodimenzionalnu simulaciju turbulentnog nestišljivog toka upotrebljen je CFD softverski paket U^2RANS za rešavanje trodimenzionalnih RANS jednačina metodom konačnih zapremina. Jednačine su zatvorene standardnim $k-\epsilon$ modelom turbulencije. Posebno je razvijen 3D modul za simulaciju produkcije i transporta TDG duž bučnice i donje vode. Jednačina za transport TDG u turbulentnom toku izvedena je iz Rejnoldsove jednačine transporta. Jednačini transporta je zatim pridodata jednačina za transfer mase (3.10). Detaljniji prikaz ovog simulacionog modela iznet je u navedenom radu.

U radu [5] je predstavljen numerički model za određivanje trodimenzionalnog polja koncentracije TDG nizvodno od brane. Korišćen je algebarski model koji uzima u obzir sile otpora kretanju i disperzione sile i koristi modifikovani $k-\epsilon$ model turbulencije. U model je uključena jednačina za transport mehura gasa da bi mogla da se proceni veličina mehura koja se menja pod uticajem transfera mase mehur/voda i pod uticajem pritiska. Koncentracija TDG se računa iz dvofazne jednačine transporta, izvedene iz jednačine transfera mase mehur/voda koja je funkcija zapremine gasa i

veličine mehura. Jednačine predloženog modela su uključene u komercijalni kod FLUENT 6.122 u kome se koriste raspoloživi algoritmi za višefazni tok, zasnovan i na metodi konačnih zapremina. Rad sadrži detaljan numerički prikaz pomenutih jednačina.

U tehničkoj literaturi se navode i CriSP (verzija 6) empirijski i mehanistički modeli za procenu procenta zasićenja (saturacije) ukupno rastvorenim gasom iznad ravnotežnog stanja (100%). U svim jednačinama ovih modela se nalaze konstante koje se određuju na osnovu rezultata terenskih merenja, različitih od slučaja do slučaja. Nedostatak generalno upotrebljivih konstanti čini ove metode neupotrebljivim na rekama na kojima se ne vrše kontinualna merenja vrednosti relevantnih parametara. Detaljniji opis CriSP modela nalazi se u studiji „Dissolved Gas Abatement Study“ (USACE, WES, 2001).

3.2.3 Oscilatorne karakteristike hidrauličkog skoka

Oscilatorne karakteristike hidrauličkog skoka zapažene su kako na hidrauličkim modelima, tako i u prirodi. Naime, zapaženo je da se kod nekih tipova skoka i pod odgovarajućim hidrodinamičkim uslovima (delimično otvaranje ustava, protoci i dr.) periodično menjaju: smer okretanja valjka, tip skoka, položaj početka skoka, proces formiranja, razdvajanja i spajanja struktura toka velike razmere i vrednosti komponenta brzina i pritiska. Ali, iako je ova pojava osmatrana u mnogim eksperimentima, samo mali broj istraživača je spominje u literaturi.

Do danas je realizovan relativno mali broj istraživanja ove pojave, a jedan od zadnjih je rad [16]. U radu se prikazuju ispitivanja oscilatornih karakteristika toka između B-skoka i skoka sa talasom na modelu sa naglo spuštenim horizontalnim dnom. Ova studija pokazuje da je opravdano da se pri projektovanju bučnice analiziraju alternativni tipovi skoka, odnosno položaji njihovih početaka, s obzirom da varijacije uzvodnih i nizvodnih hidrodinamičkih uslova (protoci, nivoi donje vode i dr.) mogu izazvati formiranje alternativnih skokova. Takođe je pokazano postojanje uređenog i determinističkog sistema, tipičnog za strukture toka čak i za takve konfiguracije strujanja mešavine voda-vazduh, koje ne pokazuju specifične, makroskopski vidljive, oscilatorne karakteristike.

Zaključci dosadašnjih istraživanja su sledeći [16]:

- Oscilacije skoka se javljaju kada se hidrodinamički uslovi, tipični za analizirane konfiguracije, nalaze između dva ili više postojanih konfiguracija.

- Pošto se oscilatorne karakteristike javljaju sa izvesnim stepenom regularnosti, moguće je definisati vremenski opseg oscilacija tipa skoka i fluktuacije početka skoka.
- Analize oscilacionog fenomena ukazuju na korelacionu vezu između nivoa slobodne površine toka, komponenta brzine i fluktuacija pritiska.
- Periodično formiranje alternativnih tipova skoka i fluktuacija početka skoka su u korelacioj zavisnosti sa strukturom vrtloga u valjku. Regularna periodična pojava pomenutih oscilacija može se opisati kao neslučajni uređeni proces, nadgrađen na neuređeno i slučajno turbulentno kretanje.
- Oscilatorne pojave su praćene promenom oblika slobodne površine skoka u funkciji koncentracije vazduha u valjku.

Zadnja istraživanja ukazuju na neophodnost izdvajanja slučajnih procesa u skoku od neslučajnih, pa su potrebna nova obimna istraživanja ovog fenomena.

Rad [17] sadrži detaljan spisak literature o modelskim ispitivanjima oscilatornih karakteristika skoka.

3.2.4 Izbor merodavnog (projektog) protoka

Jedan od najuticajnijih parametara na izbor oblika i dimenzija bučnice bez sumnje je veličina merodavnog ili projektog protoka. Iako ova tema izlazi iz okvira hidrauličkih istraživanja, smatra se da bi mogla da bude od koristi projektantima ovih objekata.

Naime, u dosadašnjoj projektnoj praksi bilo je uobičajeno da je merodavni protok za bučnicu jednak merodavnom protoku za preliv ili je nešto manji, a određivan je na osnovu unapred izabrane verovatnoće prevazilaženja. Učinak bučnice je zatim kontrolisan za veće i manje protoke da bi se proverilo da li skok uvek ostaje u bučnici. Projektanti su prvenstveno bili zainteresovani samo za opstanak objekta pri prolazu bilo kog protoka uz prihvatljiv nivo štete koja ne ugrožava opštu stabilnost bučnice, brane i nizvodnih padina rečne doline. Po pravilu, ni „opstanak“ ni „prihvatljiva šteta“ ni „ne ugrožava opštu stabilnost“ nisu bili kvantifikovani odgovarajućim inženjerskim i ekonomskim parametrima, a njihova verodostojnost se zasnivala „na osećaju“ projektanta. Analiza ekonomskog rizika se, skoro po pravilu, nije radila. Međutim, pošto su ekscesni protoci slučajne promenljive sa odgovarajućom verovatnoćom prevazilaženja, merodavni protok se može, i treba, da

određuje na osnovu metodologije projektovanja zasnovanog na učinku (Performance based design).

Projektovanje zasnovano na učinku (PBD) je koncept, ako ne nov u teoriji onda svakako vrlo savremen u praktičnoj primeni. PBD podrazumeva izradu projekta objekata koji tokom svog životnog veka, što ekonomičnije i garantovano, ispunjavaju neizvesne buduće zahteve, postavljene od korisnika objekta i prirode. Osnovna primesa je da se ciljevi i nivoi učinka mogu kvantifikovati, da se ponašanje konstrukcije može analitički predvideti i da se troškovi za ostvarivanje željenog cilja učinka mogu proceniti. Ovakav pristup omogućava razmatranje svih razloga „za i protiv“ u procesu donošenja konačne odluke. Pri tome se uzimaju u obzir svi događaji i troškovi u toku veka trajanja objekta, a ne samo troškovi njegove izgradnje. U PBD konceptu se izrazom „cilj učinka“ definiše željeni nivo učinka objekta za svaki nivo prirodnog hazarda (velike vode, zemljotres, požari i sl.) a izrazom „nivo učinka“ se definiše maksimalno dopustiv stepen štete na objektu usled dejstva nekog prirodnog hazarda određenog nivoa pojave. Iz ove definicije sledi da su nivoi hazarda i dopušteni nivoi učinka hazarda u uzajamnoj vezi. U praksi se, iz celokupnog spektra svih mogućih nivoa učinka, izdvajaju sledeća četiri odvojena nivoa: nivo A – potpuno operativan ili svrsishodan (šteta zanemarljivo mala, korišćenje objekta se nastavlja); nivo B – operativan ili funkcionalan (manja šteta, korišćenje objekta se nastavlja); nivo C – bezbedan po ljudske živote (ljudski životi su bezbedni, štete umerene po obimu); nivo D – objekat pod kolapsom ili preti kolaps (bezbednost ljudskih života je u opasnosti, šteta je ogromna ali je sprečen kolaps objekta).

Na slici 3.4 je grafički predstavljena funkcija željenog cilja učinka u zavisnosti od nivoa hazarda i nivoa učinka hazarda. Nivo hazarda se obično izražava verovatnoćom prevazilaženja.

Međutim, i gornje definicije su po neki put prilično nejasne, neprecizne i nekvantifikovane, pa se u skorije vreme sve više zamenjuju sa 3D konceptom (death – smrtni slučajevi; downtime – vreme potrebno za dovođenje objekta u potpunu operativnost; dollars – ekonomski prihvatljiva očekivana godišnja vrednost šteta izražena u novčanim jedinicama). Kvantifikovana probabilistika procene ove tri količine za svaki od nivoa nekog hazarda (na primer, zemljotresa) može se naći u literaturi. Prema saznanju autora ovog rada, takvih podataka nema za projektne nivoe ekscesnih protoka u okviru izrade projekta bučnice prema PBD konceptu. Bilo bi poželjno da se ove vrednosti odrede u okviru

Uputstva za projektovanje bučnica, slično Uputstvu za izbor merodavnih protoka za prelive na branama, izdatog 2002. godine od Stručnog odbora za

hidrauličke aspekte projektovanja brana u okviru Srpskog (tada Jugoslovenskog) društva za visoke brane.

		NIVO UCINKA HAZARDA			
		A POTPUNO OPERATIVAN	B OPERATIVAN	C BEZBEDAN PO LJUDSKE ZIVOTE	D PRED KOLAPSDOM
NIVO HAZARDA	CEST			NEPRIHVATLJIV UCINAK	
	POVREMEN				
	REDAK				
	VRLO REDAK				

osnovni cilj (diagonalna linija od CEST, A do REDAK, D)
opasan cilj (diagonalna linija od REDAK, B do VRLO REDAK, D)
cilj kritičan za bezbednost (diagonalna linija od REDAK, A do VRLO REDAK, C)

Slika 3.4 - Funkcija cilja učinka

Primena PBD koncepta podrazumeva promenu u načinu razmišljanja i rada projekatana. Najznačajnija promena je okretanje ka procesu projektovanja u kome je realno predviđanje ponašanja objekta i realistička procena uticaja kojima će objekat biti izložen u budućnosti, glavnije od empirijskih konvencija i konvencija zasnovanih na iskustvu.

Projektovanje bučnice zasnovano na učiku (uključujući i izbor merodavnog protoka) ima izvesne specifičnosti. U ovoj oblasti projektovanja, osnovni cilj je da se postigne razlozan balans između koštanja izgradnje i troškova dugoročnog održavanja, rehabilitacije ili rekonstrukcije, bez povećanja rizika za ljude ili materijalna dobra kao i bez ugrožavanja sigurnosti brane i nizvodnih dolinskih strana.

Izbor merodavnog protoka za bučnicu prema PBD konceptu mora da se odvija fazno u, recimo, sledećih pet faza razvoja.

I faza: analiza i determinacija nivoa hazarda; preporučuju se sledeća 4 nivoa

$Q_{0.01}$	$2 \times Q_{0.01}$	$Q_{0.001}$	Q_{max}
------------	---------------------	-------------	-----------

II faza: hidrauličko i konstruktivno oblikovanje bučnice i pratećih zaštita bar za četiri napred navedena protoka (bar 4 varijante bučnice).

III faza: analiza reakcije svake od varijantnih bučnica na uticaj svakog protoka većeg od

merodavnog za tu varijantu (analitička procena dubine erozije i, posledično, stabilnosti bučnice, brane i dolinskih strana).

IV faza: kvantitativno određivanje svih oštećenja na bučnici, na brani i u rečnom koritu koja se moraju sanirati, tj. dovesti u prethodno stanje i to za svaku varijantu posebno.

V faza: procena vremena potrebnog za popravku, procena povećanja rizika usled narušene operabilnosti bučnice (ljudski životi, materijalne štete), probabilistička procena troškova sanacije opštećenja, tj. očekivana godišnja vrednost (matematičko očekivanje) sanacije izražena u „novačana jedinica/godišnje“; (ova vrednost se naziva i „ekonomski prihvatljiv rizik“)

Funkcija cilja pri izboru optimalnog merodavnog protoka je:

$$\sum T = \min$$

gde je:

$\sum T$ – aktualizovana vrednost zbira investicija i godišnjih troškova sanacije

Ograničenja su ili funkcija cilja učinka ili kvantifikovani parametri u 3D konfiguraciji.

U 3D konfiguraciji predlažu se sledeći dozvoljeni parametri cilja:

- najveće prihvatljivo trajanje sanacije = period između završetka povodnja i prognoznog početka povodnja u sledećoj godini

- ljudske žrtve = neprihvatljive
- prihvatljiv ekonomski rizik = 1000 \$/god.

Jedna od mogućih funkcija cilja učinka u zavisnosti od nivoa hazarda i nivoa učinka hazarda prikazana je na slici 3.5.

		NIVO UCINKA HAZARDA			
		A	B	C	D
NIVO HAZARDA	CEST	$Q_{0,01}$			NEPRIHVATLJIV UCINAK
	POVREMEN	$2 \times Q_{0,01}$			
	REDAK	$Q_{0,01}$	PRIHVATLJIV UCINAK		
	VRLO REDAK	Q_{prom}			

slika 3.5 FUNKCIJA CILJA UCINKA ZA BUČNICE

Slika 3.5. Funkcija cilja učinka za bučnice

U dijagramu na slici 3.5, nivoima A, B, C, D odgovaraju sledeći kriterijumi učinka:

- Nivo A: Nema rizika od rušenja bučnice, preliva, brane i nizvodnih kosina doline; nema ljudskih žrtava i nizvodnih materijalnih šteta, oštećenja mala.
- Nivo B: Nema rizika od rušenja napred navedenih objekata, nema dodatnih rizika za ljude i materijalna dobra; oštećenja srednja.
- Nivo C: Nema rizika od rušenja napred navedenih objekata niti dodatnog rizika za ljude i materijalna dobra, oštećenja velika.
- Nivo D: Nema dodatnog rizika po ljude i materijalna dobra; oštećenja vrlo velika ali je analitički dokazano da nema rizika od rušenja bučnice, preliva, brane i nizvodnih kosina doline u neprihvatljivoj razmeri.

Mora se pokazati analitičkim postupcima i procenom troškova da su gornji kriterijumi zadovoljeni a ne procenama „po osećaju“ ili „na bazi iskustva“.

Hidrauličke i konstruktivne karakteristike varijantnih rešenja za bučnice koje se koriste u PBD procesu moraju zadovoljavati gornju funkciju cilja učinka ili

dozvoljene parametre prema 3D konfiguraciji. U protivnom, ne mogu se koristiti u optimizacionoj analizi zasnovanoj na učinku.

Neophodne su dodatne studije i diskusije o ovoj temi.

4. BUČNICA SA KLASIČNIM HIDRAULIČKIM SKOKOM

Hidraulički skok koji se formira u glatkom prizmatičnom kanalu sa horizontalnim dnom, konstantog pravougaonog preseka, naziva se „klasičan hidraulički skok“. Dubina na kraju ovog skoka jednaka je dubini donje vode.

Klasičan hidraulički skok može da ima razne izgleda, zavisno od veličine prilaznog Frudovog broja (tab. 4.1).

Bučnice sa klasičnim hidrauličkim skokom se retko koriste u praksi jer u većini praktičnih slučajeva dubina donje vode varira u širokim granicama pa skok obično ostaje u bučnici samo za jednu dubinu donje vode, odnosno za merodavni protok. Sem toga, dužina bučnice sa hidrauličkim skokom je dosta veća od dužine drugih tipova bučnice.

Tabela 4.1.

F_1	Odnos dubina vode pre i posle skoka	Opisni izgled skoka	Rasipanje energije
1 – 1.7	1.0 – 2.0	Talasasti skok	< 5%
1.7 – 2.5	2.0 – 3.1	Predskok (serija malih valjaka)	5% - 15%
2.5 – 4.5	3.1 – 5.9	Prelazni ili oscilatorni skok	15% - 45%
4.5 – 9	5.9 – 12.0	Stabilan, jasno definisan skok	45% - 70%
> 9	> 12.0	Jasno definisan, turbulentan skok	70% - 85%

U sledećem tekstu se, ipak, prikazuju jednačine za određivanje veličine osnovnih karakteristika klasičnog hidrauličkog skoka s obzirom da se one često koriste kao referentne za odgovarajuće vrednosti drugih tipova hidrauličkog skoka. Sve karakteristike klasičnog hidrauličkog skoka označene su zvezdicom (*).

Odnos spregnutih dubina u ovom tipu skoka je osnovna karakteristika svakog tipa hidrauličkog skoka, a za klasičan hidraulički skok određen je dobro poznatim izrazom

$$Y^* = h_2^*/h_1 = \frac{1}{2} \left[(1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1 \right] \quad (4.1)$$

gde su:

$$F_1 = V_1 / (gh_1)^{1/2} - \text{Frudov broj na početku skoka}$$

h_1, h_2^* - dubine bode na početku i kraju skoka (prva i druga spregnuta dubina)

Za $F_1 > 2$ jednačina 4.1 se može aproksimirati izrazom [6]

$$Y^* = \sqrt{2}F_1 - 1/2 \quad (4.2)$$

Smičući naponi u dnu bučnice utiču na odnos Y^* , a odgovarajući izrazi su navedeni u [1] i [8]. Ipak, eksperimentima je utvrđeno da za $F_1 < 10$; $(h_1/b) < 0.1$ (b - širina bučnice) i $q > 0.1$ m³/sek/m naponi smicanja zanemarljivo malo utiču na vrednost Y^* prema izrazu 4.1.

Dužina valjka u skoku definišana je izrazima [1]

$$\lambda_R^* = L_R^* / h_1 = -12 + 8\alpha_R \tanh(F_1 / \alpha_R) \quad (4.3)$$

gde je:

$$\alpha_R = 20 \text{ za } h_1/b < 0.1 \text{ i } \alpha_R = 12.5 \text{ za } 0.1 < h_1/b < 0.7$$

Za $F_1 < 6$ jednačina 4.3 se može aproksimirati izrazom

$$\lambda_R^* = -12 + 8F_1 \quad (4.4)$$

Dužina skoka, definisana kao rastojanje između početka skoka i tačke u kojoj mere zaštite dna nisu potrebne, određuje se iz izraza [6]

$$\lambda_j^* = 220 \tanh[(F_1 - 1) / 22] \quad (4.5)$$

Za $4 < F_1 < 12$ aproksimativni odnos je $\lambda_j^* = 6$

Slobodna površina skoka varira u granicama $0.2(h_2^* - h_1)$ a prosečni profil je određen izrazom

$$\bar{y} = \tanh(1.5X) \quad (4.6)$$

$$\text{gde je: } X = x / L_R^*, \quad \bar{y} = \frac{h - h_1}{h_2^* - h_1}$$

Rasipanje energije u klasičnom hidrauličkom skoku je jednako gubitku pritiska i može se odrediti pomoću izraza

$$\zeta^* = [1 - (\sqrt{2} / F_1)]^2 \quad (4.7)$$

$$\text{gde je: } \Delta H^* - \text{gubitak pritiska; } H_1 = h_1 + V_1^2 / 2g$$

Raspodela brzine u bilo kom vertikalnom preseku određena je, za $0 < Z < 1$, izrazom

$$U = [\cos(100z)]^2 \quad (4.8)$$

gde je

$$U = (u - u_s) / (u_m - u_s)^2 \quad Z = (z - \delta_o) / (h - \delta_o)$$

z - vertikalno rastojanje od dna; u_s - brzina na površini skoka

u_m - maksimalna brzina

x - rastojanje od početka skoka

$$X = x / L_R^*$$

Maksimalna standardizovana brzina u pravcu strujanja,

$$U_m = (u_m + V_2^*) / (V_1 - V_2^*), \text{ određuje se iz izraza}$$

$$U_m = \exp(-2X^{1.8}) \quad (4.9)$$

Maksimalna povratna brzina $U_S = u_S/V_2^*$, za $0.05 < X < 1.4$, može se izračunati pomoću jednačine

$$U_S = -\sin[(X + 0.1)/1.1] \quad (4.10)$$

Maksimalna povratna brzina je jednaka površinskoj povratnoj brzini za $X > 1$.

Debljina graničnog sloja za $0.05 < X < 1.2$ definisana je izrazom

$$\frac{\delta_o}{h_2^* - h_1} = 0.06 [1 + 5(X - 0.25)^2] \quad (4.11)$$

5. BUČNICA SA NAGNUTIM PRILAZNIM TOKOM I HORIZONTALNIM DNOM

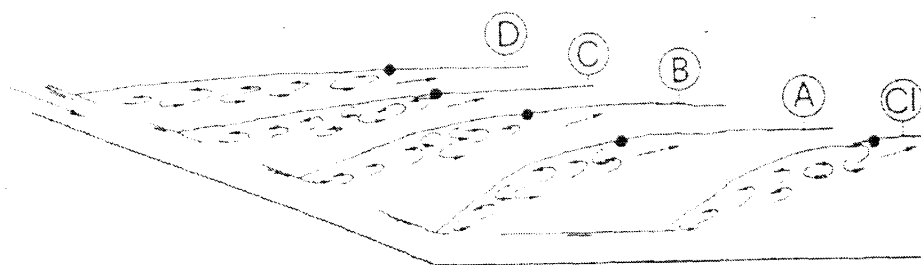
Teoretski, hidraulički skok u ovom tipu bučnice nije klasičan hidraulički skok jer prilazni tok nije horizontalan.

U ovom tipu bučnice mogu se formirati sledeći tipovi hidrauličkog skoka, svrstani na osnovu lokacije početka i kraja skoka:

- A skok: početak skoka u prelomnoj tački
- B skok: početak skoka na nagnutom delu a kraj na horizontalnom delu
- C skok: početak skoka na nagnutom delu a kraj u prelomnoj tački
- D skok: početak i kraj skoka na nagnutom delu

Gornja klasifikacija je grafički prikazana na slici 5.1

Razlika između A skoka i klasičnog skoka je samo u pravcu prilaznog toka (nagnut umesto horizontalan). Ipak, za praktičnu upotrebu je sasvim zadovoljavajuća aproksimacija A skoka klasičnim hidrauličkim skokom.



Slika 5.1. Klasifikacija skoka [6]

Gore navedeni tipovi skoka se obično formiraju kada je prirodna dubina vode u rečnom koritu znatno veća od druge spregnute dubine hidrauličkog skoka.

U većini praktičnih slučajeva dno ovog tipa bučnice se spušta ispod prirodnog dna rečnog korita, što je čini manje rizičnom na pobeg hidrauličkog skoka iz nje. U takvim slučajevima izlazni deo iz bučnice mora da bude oblikovan tako da su proticajne površine u poprečnim presecima izlaznog dela približno jednake proticajnoj površini na kraju bučnice. Ukoliko bi bile manje, formiralo bi se veštačko povećanje energetskog potencijala na kraju izlaznog dela, što je tehnički besmisleno, a za takav postupak nema ni ekonomskog opravdanja. Navedeni uslov se može ispuniti ili postepenim povećanjem širine dna na hidraulički prihvatljivoj dužini izlaznog dela ili postepenim prelaskom sa pravougaonog na trapezni poprečni presek izlaznog dela. Šema bučnice sa nagnutim prilazom,

upuštenim horizontalnim dnom i izlaznim delom prikazana je na slici 5.2.

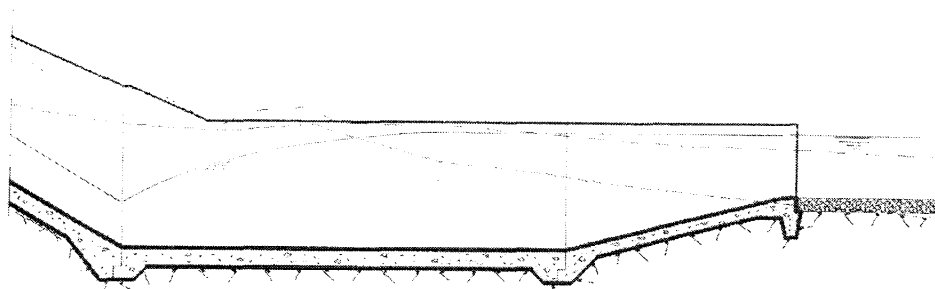
Osnovne karakteristične veličine hidrauličkog skoka tipa B, C i D detaljno su prikazane u literaturi [6] i [18]. Sledi prikaz jednačine za proračun osnovnih parametara. Na slici 5.3 grafički su prikazane korišćene oznake.

(a) C i D skokovi

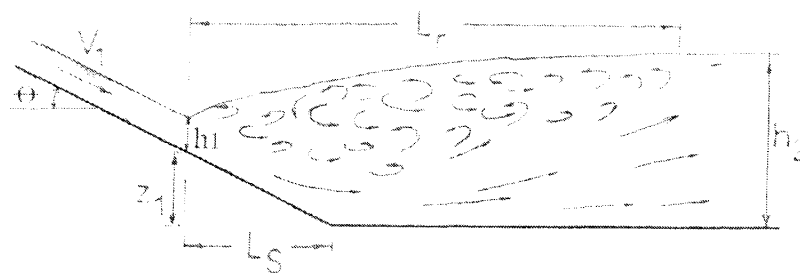
$$Y = \frac{h_2}{h_1} = (1/2)[(1 + 8F_{1S}^2)^{1/2} - 1] \quad (5.1)$$

$$F_{1S} = \frac{(\cos \theta)^{3/2}}{(1 - 2K + \tan \theta)^{1/2}} F_1 = \Gamma_S F_1 \quad (5.2)$$

Koeficijent K je faktor pada koji zavisi od F_1 i θ . Vrednosti K su prikazane u [18].



Slika 5.2. Bučnica sa izlaznim delom



Slika 5.3. Šema koiršćenih oznaka [6]

$$\log \Gamma_s = 0.027 \theta^0 \quad (5.3)$$

$$Y = (\sqrt{2} \cdot 10^{0.027\theta} \cdot F_1) - (1/2) \quad (5.4)$$

$$L_j / L_j^* = \exp(-4/3)\theta \quad (5.5)$$

Prihvatljive aproksimacije su:

Jednačina 5.5 važi za $\tan\theta < 0.3$, tj. $\theta < 17^\circ$.

Prema literaturi [20] za D skok važe sledeći odnosi pri $0^\circ < \theta < 19^\circ$ i $4 \leq F_1 \leq 14$

$$\frac{L_1}{y_2} = 5.75 \tan \theta + 5.7$$

$$\frac{y_t}{y_1} = (0.077\theta^{1.27} + 1.41)(F_1 - 1) + 1$$

(b) B skok

U praksi je formiranje B skoka učestalije u odnosu na C i D skokove.

Prema [18] odnos Y povećava se proporcionalno sa dužinom L_s .

Za $h_2 > 1.3 h_2^*$ i $\tan\theta < 0.3$, dubina h_2 može se izračunati iz odnosa

$$h_2 / h_2^* = 0.92 + [(L_s / h_2^*) - 1] \tan \theta \quad (5.6)$$

U [18] su prikazani grafikoni za proračun dužine B, C i D skoka.

U [6] su date sledeće zavisnosti za B skok pri $\theta = 30^\circ$ i 45° .

$$Y = 3.75E^{-\tan\theta} + (\sqrt{2}(F_1 - 3) / \tanh(3.5 \cos \theta)) \quad (5.7)$$

$$E = (h_2 - z_1) / h_2$$

gde je z_1 – visinski položaj početka skoka u odnosu na horizontalno dno.

Dužina skoka za $\theta = 30^\circ$; $0.1 < E < 0.6$ i $\lambda_j > 6$ je

$$\lambda_j = L_j / h_2 = 6.85 (1 + 1/4E) - (1/7) (F_1 - 2) \quad (5.8)$$

Prema literaturi [20] za B skok, pri $4 \leq F_1 \leq 14$, važe sledeći odnosi

- za $0^\circ < \varnothing < 19^\circ$

$$L_j/y_2 = 5.75 \tan \varnothing + 5.70$$

- za $19^\circ < \varnothing < 60^\circ$

$$L_j/y_2 = 4.6 (y_1/y_2 - 1) + 5.7$$

Spregnuta dubina y_2 racuna se pomocu izraza

$$\left[\frac{y_1}{y_2} - 1 \right]^{0.75} = \frac{l/y_2}{\left[\frac{2.3}{(\tan \theta)^{0.73}} - 0.8 \right]} \quad (5.9)$$

gde je:

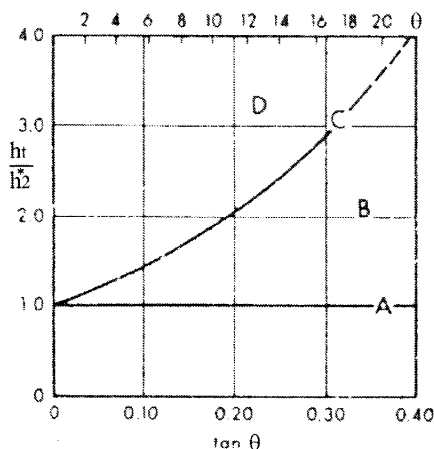
l - dužina nagnutog dela.

Ostali odnosi su isti kao za skok D.

Efikasnost bučnice sa B, C i D skokovima je uvek manja u odnosu na bučnicu sa klasičnim skokom. Njihova efikasnost zavisi od F_1 i ugla θ i smanjuje se sa povećanjem ovog ugla. Tako, na primer, za $F = 12$, gubitak energije i klasičnom hidrauličkom skoku je oko 85% a u C skoku oko 61%. Analiticki izraz za gubitak energije u C i D skokovima i odgovarajući dijagrami prikazani su u literaturi [19].

Tip skoka koji se formira na nagnutom delu zavisi od nagiba dna, nivoa donje vode i režima superkritičnog strujanja. Tip skoka koji se formira u nagnutom prilaznom kanalu lako se određuje pomoću dijagrama na slici 5.4

Lokacije B i D tipova određuju se na osnovu napred iznetih jednačina metodom postepenog približavanja.



Slika 5.4. Tip skoka [19]

6. BUČNICE SA NAGNUTIM DNOM

Ovaj tip bučnice se koristi u situacijama kada ekonomski i drugi razlozi nalažu da količina i dubina iskopa bude minimalna, uz uslov da, za izabrani nagib dna, dubina donje vode nije manja od druge spregnute dubine hidrauličkog skoka pri svim protocima. Obično se koristi na rekama sa koritom usečenim u čvrstu stensku masu. Na slici 6.1 prikazane su dve izvedene bučnice ovog tipa.

Hidraulički skok koji se, pri merodavnom protoku, formira u ovom tipu bučnice treba da je skok tipa D sa početkom na uzvodnom kraju nagnutog dna.

U pomenutoj monografiji 25 [18] ovaj tip bučnice je označen kao „bazen V“. Svi karakteristični parametri hidrauličkog skoka mogu se odrediti pomoću odgovarajućih grafikona, sadržanih u ovoj monografiji.

Efikasnost bučnice sa nagnutim dnom je manja od bučnice sa klasičnim hidrauličkim skokom i opada sa porastom ugla nagiba (θ). Približna vrednost gubitka energije (ΔE) je određena izrazom:

$$\frac{\Delta E}{E_1} = \frac{\left(1 - \frac{y_2}{y_1}\right) + \frac{F_1^2}{2} \left(1 - \frac{1}{(y_2/y_1)^2}\right) + \tan \theta \left(\frac{L}{y_1}\right)}{1 + \frac{F_1^2}{2} + \tan \theta \left(\frac{L}{y_1}\right)} \quad (6.1)$$

$$E_1 = L \tan \theta + y_1 + V_1^2 / 2g \quad (6.2)$$

gde je:

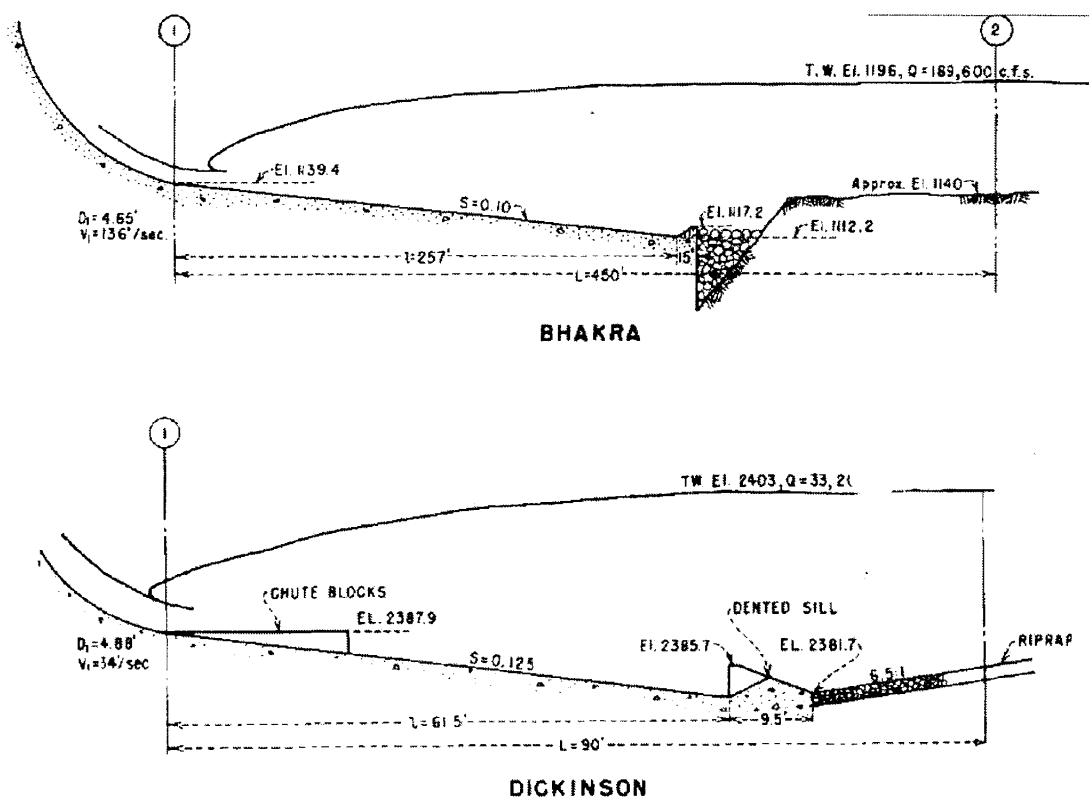
F_1 – prelazni Frudov broj;

y_1, y_2 – vertikalne dubine vode na početku i kraju skoka;

L – dužina skoka

Za najnepovoljniji odnos dubine donje vode (y_1) i dubine y_2 , odnosno za najnepovoljniji protok, dopušta se formiranje skoka tipa C. Moguća je i kombinacija sa nagnutim i horizontalnim dnom ukoliko je, pri protocima manjim od merodavnog, moguće formiranje A ili B skoka.

Upotreba bučnica sa nagnutim dnom je retka kod preliva visokih brana. Mogla bi da bude ekonomski opravdana ako je brzotok u malom nagibu na delu spoja sa rečnim dnom.



Slika 6.1. Bučnica sa nagnutim dnom [18]

7. BUČNICE SA NAGLIM ILI POSTEPENIM PROŠIRENJEM

Bučnica sa naglim povećanjem širine u odnosu na širinu dovodnog kanala je interesantna zbog konstruktivne kompaktnosti ovakvog tipa objekta, premda hidraulički nije povoljna.

U bučnici ovog tipa mogu se formirati tri tipa hidrauličkog skoka:

- Odbačeni skok (R) sa burnim režimom u prvom delu bučnice
- Prostorni skok (S) sa početkom skoka na početku proširenja i sa generacijom oscilirajućeg čak i asimetričnog ulaznog strujanja
- Tranzitni skok (T) sa početkom skoka u prilaznom kanalu i telom skoka u proširenju.

S-skok je izraženo prostoran, nestabilan i izuzetno dugačak. T-skok je stabilne konfiguracije pri određenim uslovima, ali lako prelazi u S-skok pri malom povećanju

dubine donje vode. Formiranje T-skoka u bučnici ovog tipa jedino je prihvatljivo rešenje.

Odnos $Y = h_2/h_1$ za T-skok zavisi od lokacije početka skoka ($x_1 = x_1/L_R^*$); i odnosa širina ($B = b_2/b_1$). Prema literaturi [6] odnos spregnutih dubina je:

$$\Psi = (Y^* - Y)/(Y^* - 1) = \left[1 - (1/\sqrt{B}) \right] \left[1 - \tanh(1,9X_1) \right] \quad (7.1)$$

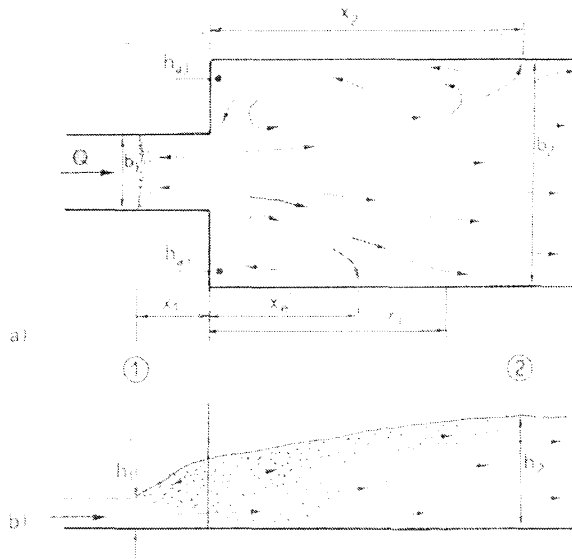
Saglasno sa ovom jednačinom, skok sa malom vrednošću X_1 i velikom vrednošću B je stabilan, dok se početak skoka primešta lako ako je X_1 veliko, a B blizu jedinice.

U izrazu $X_1 = x_1/L_R^*$ je $L_R^* = 4.3 h_2^*$ a x_1 je unapred izabrana vrednost.

Oblast primene jednačine 7.1 je ograničen na sledeće intervale:

$$1 \leq B \leq 10; \quad 2.5 < F_1 \leq 12 \text{ i } 0.03 \leq X_1 \leq 1.5$$

Skice i oznake za ovaj tip bučnice prikazane su na slici 7.1.



Slika 7.1. Šema bučnice sa naglim proširenjem [6]

Približan izraz za određivanje efikasnosti bučnice je:

$$\eta = \frac{H_1 - H_2}{H_1} = \left[1 - \frac{Y}{F_1^2} \right]^2 \approx \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} (1 - \Psi) \right]^2 \quad (7.2)$$

Jednačina važi za $F_1 > 2.5$

Disipacija energije se smanjuje skoro linearno sa povećanjem vrednosti B.

Visina bočnog zida (h_a) za $B > 1$ može se odrediti iz izraza

$$Y_a = h_a / h_1 \approx Y^* \left\{ \left[B(1 - \Psi)^2 - 1 \right] / (B - 1) \right\} \quad (7.3)$$

Dužina T-skoka ($L_j = x_1 + x_j$) definisana je izrazom:

$$L_j / L_j^* = 1 + \Psi \quad (7.4)$$

Važne karakteristike skoka su dužine vrtloga u uglovima bučnice koje su tipične za strujanje u naglo proširenom toku. Za asimetrični tok dužina većeg vrtloga je obeležena sa x_2 a kraćeg sa x_e . Za simetrični tok obe teže istoj vrednosti. Veličine ovih parametara su:

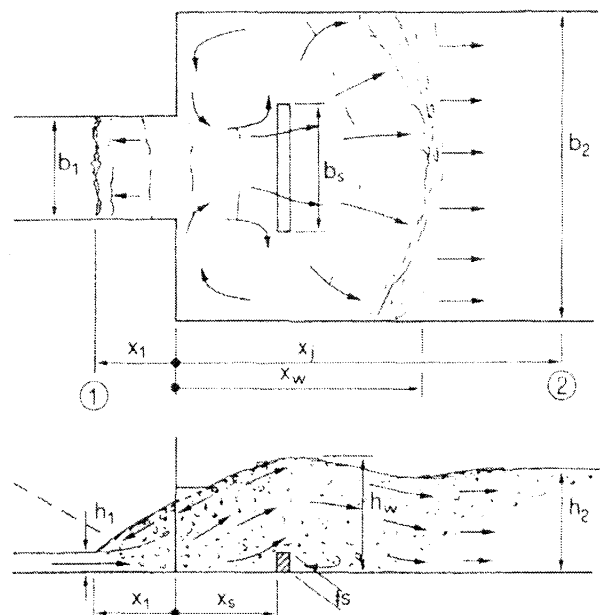
$$X_e = 2 x_e / (b_2 - b_1) = 5.25 (B - 1)^{2/3}$$

$$X_2 = 2 x_2 / (b_2 - b_1) = 10 (B - 1)^{2/3}$$

Rezultati dosadašnjih studija pokazuju da ovaj tip bučnice ima brojne loše karakteristike u odnosu na bučnicu sa klasičnim skokom i generalno nije podesan kao efikasan rasipač energije. Premda zahteva manju dubinu vode i ima veću efikasnost u odnosu na bučnicu sa klasičnim skokom, učinak joj može biti izuzetno loš kada je odnos B veliki ili je početak skoka blizu proširenja.

T-skok može postati asimetričan ako je $B > 1.4$ i izrazeno asimetričan za $B > 2$. Step en asimetrije se značajno povećava sa smanjenjem vrednosti X_1 . Dužina T-skoka je uvek veća od dužine klasičnog skoka.

Napred iznete loše karakteristike bučnice sa naglim proširenjem mogu se popraviti ukoliko se na dno bučnice postavi poprečni centralni prag (slika 7.2) čime se proizvodi simetričan tok i kompaktan skok.



Slika 7.2. Bučnica sa naglim proširenjem i pragom [7]

Bučnica sa naglim proširenjem i pragom može se posmatrati kao generalizovana bučnica USBR, tip III koja se koristi za specifične protoke do $20 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^1$, za brzine do $20 \text{ m}^3/\text{s}$ i za $F_1 > 4.5$.

Osnovne karakteristične veličine su sledeće:

$$h_{2S} = 0.95 h_2 \quad (7.7)$$

gde su h_{2S} i h_2 – druge spregnute dubine za skok sa pragom i skok bez praga

$$L_{Sj} / L_j^* = (1 + \Psi)(0.90 - 0.02 F_1) \quad (7.8)$$

gde je $L_j^* = 6h_2^*$

$$b_s/b_1 = 1 + (1/4)(B-1) \quad (7.9)$$

$$X_S = x_s / L_R^* = (3/4)(S / F_1)^{3/4} \quad (7.10)$$

Optimalan položaj praga se nalazi u sledecem intervalu

$$0.4 < (x_s/b_1) / (B-1) < 6 \quad (7.11)$$

Optimalnu visinu zida treba tako izabrati da bude zadovoljena jednačina 7.11 kao i odnos

$$S = s / h_1 \leq (F_1 - 1) / 2 \quad (7.12)$$

Maksimalna visina talasa (h_w) je

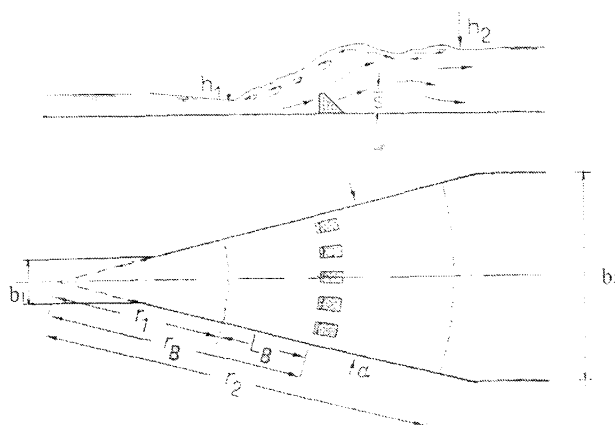
$$h_w/h_2 = 0.9 + 1/140 (15 - F_1) (S/X_S) \quad (7.13)$$

Položaj tačke uranjanja toka u telo skoka varira oko $\pm 15\%$ oko vrednosti x_s određene pomoću izraza

$$x_s / h_{2S} = 5.6 - 0.2 F_1 \quad (7.14)$$

Naglo proširena bučnica sa pragom podesna je za korišćenje pri $1 < B \leq 5$; $3 < F_1 \leq 10$; $0.6 < S < 2$; $X_1 \geq 0.2$ i $0.1 < X_S < 6$

Skica bučnice sa postepeno promenljivom širinom prikazana je na slici 7.3



Slika 7.3. Bučnica sa postepeno promenljivom širinom [6]

Prednosti u odnosu na bučnicu prizmatičnog oblika su:

- potrebna dubina vode je manja
- bučnica može biti korišćena i kada je nivo donje vode veoma promenljiv.

Tendencija toka da bude nestabilan sprečava se postavljanjem standardnih USBR blokova sa blokadom 50%.

Relativne vrednosti dimenzija sa slike 7.3 su

$$R_B = r_B / r_1; \quad R_r = r_2 / r_1 > 1$$

Relativna blokada blokovima je

$$\lambda_B = S / \{1 + [R_B - 1] / (R_r - 1)\} (Y - 1) \quad (7.15)$$

Odnos spregnutih dubina je

$$Y = Y_o [1 + \lambda_B S F_1]^{-0.1} \quad (7.16)$$

$$Y_o = 0.3 R_r + 0.65 (1 + R_r^{-1}) F_1 \quad (7.17)$$

Najefikasnija lokacija blokova određena je izrazom

$$R_B = 1 + (1/2)(L_j \cdot r_1) \quad (7.18)$$

Obično se usvajaju vrednosti r_1 , sa odgovarajućim brojem F_1 , x (obično $x = 0.5$) i S , a računaju vrednosti Y i R_r .

Tendencija toka da bude asimetričan zanemarljiva je za $F_1 < 6$.

Izabran ugao divergencije (α) treba da zadovoljava uslov

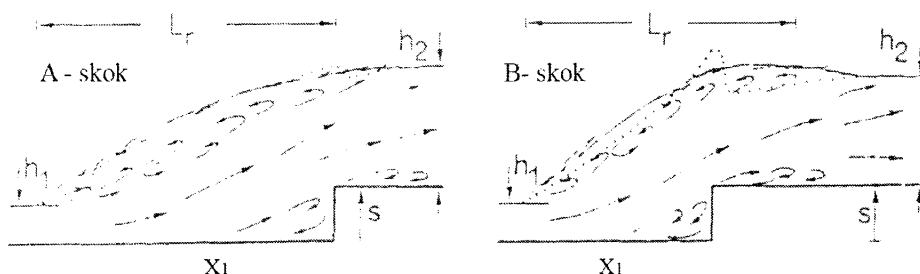
$$\alpha/2 \leq \tan^{-1} (1/1.5 F_1) \quad (7.19)$$

8. BUČNICE SA STEPENICOM

Izgradnja bučnice sa stepenicom umesto bučnice sa klasičnim hidrauličkim skokom je jedan od načina da se hidraulički skok zadrži u bučnici ako se nivo vode menja u većem opsegu.

Stepenica u bučnici, visine s , može da bude izdignuta iznad dna bučnice (pozitivna stepenica) ili spuštena ispod dna prilaznog kanala (negativna stepenica). Osnovni parametri ovog tipa bučnice su relativna visina stepenice $S = s/h_1$ i položaj početka skoka u odnosu na početni presek stepenice. U bučnici sa pozitivnom stepenicom mogu se formirati dva osnovna tipa skoka (slika 8.1).

- A-skok sa krajem valjka u početnom preseku stepenice ($x_1=0$)
- B-skok sa valjkom delimično smeštenim i uzvodno i nizvodno od početnog preseka stepenice ($x_1>0$).



Slika 8.1. A-skok i B-skok u bučnici sa pozitivnom stepenicom [6]

U slučaju da nivo donje vode znatno opadne, može se formirati buran tok u bučnici sa stalnim talasom, što je slučaj koji ne treba dopustiti.

Spregnute dubine hidrauličkog skoka međusobno su vezane odnosom

$$Y = Y^* + \Delta Y \quad (8.1)$$

gde je $Y = h_2 / h_1$

$$\Delta Y = (-S) / [1 + \alpha_s (S / F_1)] \quad (8.2)$$

gde je $\alpha_s = \sqrt{2}$ - za A-skok; $\alpha_s = 1 / \sqrt{2}$ - za B-skok

Dužina valjka je definisana izrazom:

$$L_R = \alpha_R (h_2 + s) \quad (8.3)$$

gde je $\alpha_R = 4.75$ - za A-skok; $\alpha_R = 4.25$ - za B-skok

Dužina skoka je

$$L_j = 6(h_2 + s) \quad (8.4)$$

Dužina bučnice, ukoliko mogu da se formiraju oba tipa skoka, što je najčešći slučaj u praksi, mora da bude

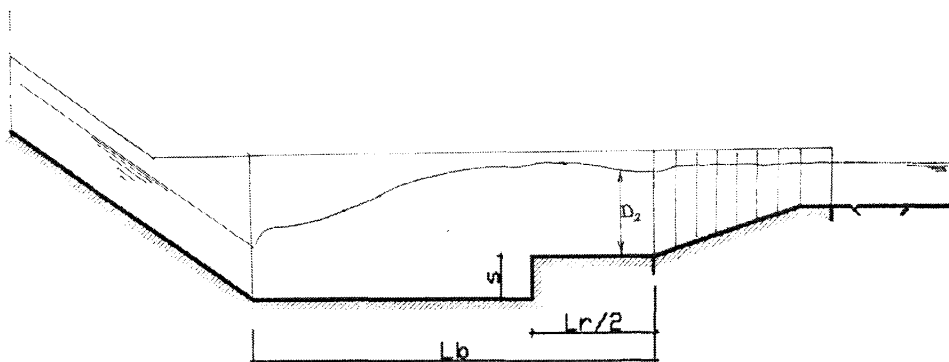
$$L_b = 9(h_2 + s) \quad (8.5)$$

Skica bučnice sa pozitivnom stepenicom prikazana je na slici 8.2

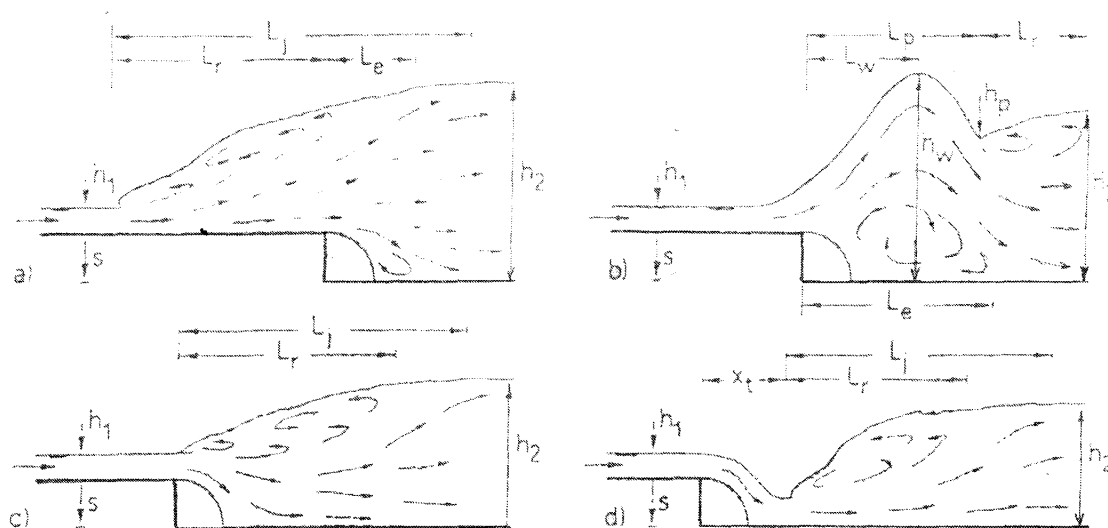
Bučnica sa pozitivnom stepenicom duža je od bučnice sa klasičnim skokom za oko 50% ako početak A-skoka nije na nagnutoj prilaznoj deonici i ako je moguće formiranje oba tipa skoka u njoj.

U bučnici sa negativnom stepenicom mogu se formirati sledeća četiri tipa skoka (slika 8.3).

- A-skok sa krajem valjka u početnom preseku spušenog dna
- skok sa stalnim talasom
- B-skok sa početkom skoka u početnom preseku spušenog dna
- minimalni B-skok sa horizontalnim burnim skokom uzvodno od stepenice i početkom skoka na spušenom delu bučnice



Slika 8.2. Bučnica sa pozitivnom stepenicom



Slika 8.3. Tipovi skoka u bučnici sa negativnom stepenicom [6]

Ukoliko je ivica stepenice zaobljena, izostaje pojava skoka sa stalnim talasom, pod uslovom da je:

$$F_1 > F_{1L} = 2.9 S^{0.047} \quad (8.6)$$

Pošto je za $F_1 < 4$ efikasnost bučnice loša, maksimalna visina stepenice ograničena je na vrednost $S = 2$.

Smanjenje odnosa spregnutih dubina $\Delta Y = Y^* - Y$ iznosi:

$$\text{za A skok: } \Delta Y = 1.1 S - 0.074 S^{1/2} (F_1 - 1) \quad (8.7)$$

$$\text{za min. B-skok: } \Delta Y = S^{1/4} - 0.35 (F_1 - 1) \quad (8.8)$$

Relativna dužina valjka je različita za svaki od mogućih tipova skoka ali se za svaki skok može aproksimirati izrazom

$$\lambda_R = L_R / h_1 = -5 + 5S + [8(F_1 - 1)] / [1 + (0.15S)^2] \quad (8.9)$$

Prilikom izbora dužine bučnice mora se pretpostaviti da je moguće formiranje i skoka tipa A i skoka tipa B, pa minimalna dužina bučnice treba da je $L_B = 2L_R$. U literaturi [6] je prikazan dijagram na osnovu koga se može odrediti dužina bučnice sa zaobljenim negativnim pragom.

Hidraulički skok u bučnici sa negativnom stepenicom bio je predmet mnogobrojnih ispitivanja, a saopštenja u tehničkoj literaturi su kontradiktorna. Neki od istraživača

preporučuju da se odgovarajućim dimenzijama bučnice onemogućavaju pojava skoka sa stalnim talasom. Drugi smatraju da je ovaj tip skoka povoljan, s obzirom na male vrednosti fluktuirajuće komponente ukupnog pritiska na dno, što smanjuje potrebnu debljinu ploče na dnu, premda povećava visinu bočnih zidova bučnice. Jedan broj istraživača naglašava pojavu oscilatornih fenomena, posebno cikličku promenu tipa skoka pri određenom režimu strujanja. Oscilatorne karakteristike hidrauličkog skoka opisane su u poglavlju 3. tačka 3.2.4. ovog rada. Oscilacije između dva različita tipa skoka su uzrok fluktuacije hidrodinamičkih karakteristika toka u nizvodnom regionu skoka, kao što su profil slobodne površine vode i fluktuirajuće komponente brzine i pritiska. S obzirom na napred rečeno, potrebno je da se, najpre za merodavan protok, definišu vrednosti F_1 i y_1/y_1 i izabere neka početna visina stepenice (s), pa zatim ponovi procedura za manje protoke pri istoj visini stepenice. Ova procedura se ponavlja za nekoliko visina stepenice da bi se odredila optimalna vrednost ovog parametra. Procedura i dijagrami iz rada [21] znatno olakšavaju ovaj posao. Krajnji cilj je da se onemogućavaju pojava neželjenih oscilatornih karakteristika hidrauličkog skoka. Ukoliko ovu pojavu nije moguće izbeći, preporučuje se da se, u procesu projektovanja, uzmu u razmatranje sve konfiguracije toka koje se mogu ponavljati tokom vremena, sa posebnom pažnjom na nepovoljnije režime strujanja pod uticajem karakteristika donje vode i fluktuacije pritiska u bučnici.

Napred opisane pojave su razlog što su, u procesu izrade projekta, neizbežna hidraulička modelska ispitivanja bučnice sa negativnom stepenicom.

Bučnice sa pozitivnom ili negativnom stepenicom retko se koriste u praksi jer je mnogo lakše postaviti pragove i blokove na horizontalnom dnu bučnice nego menjati nivo dna u profilima stepenica.

9. BUČNICE SA PRINUDNIM SKOKOM

Ako je nivo donje vode dovoljno nizak, hidraulički skok će se formirati negde nizvodno od bučnice. Postavljanjem dodatnih elemenata po dnu bučnice, kao što su pragovi i blokovi, skok će se prinudno zadržati u prostoru bučnice i pri niskim nivoima vode. Skok, formiran na ovaj način, poznat je u literaturi pod nazivom prinudni hidraulički skok (forced hydraulic jump). Prinudni skok je osnovni element dobro poznatih i mnogobrojnih bučnica sa hidrauličkim skokom, o kojima je raspoloživa velika količina informacija o njihovom obliku i hidrauličkim dimenzijama.

Ovo poglavlje ne sadrži detaljan opis najpoznatijih bučnica sa prinudnim skokom niti izraze koji definišu njihove osnovne hidrauličke karakteristike. Zainteresovani to mogu naći u mnogim publikacijama i priručnicima. Literatura [1] sadrži vrlo detaljan prikaz objavljenih radova u vezi sa ovom materijom.

Oblici i dimenzije najpoznatijih standardnih bučnica sa prinudnim skokom su rezultat modelskih ispitivanja u USBR laboratorijama. Kao završni objekti preliva visokih brana najviše se koriste bučnice tipa II i III. Standardne bučnice tipa II se preporučuju za brane visine do 60 m, a one tipa III za prilazne brzine do 18.0 m/s. Treba naglasiti da modelska ispitivanja standardnih bučnica nisu potrebna ako se koriste pod navedenim ograničenjima. Ali, praktično iskustvo pokazuje da se standardni tipovi USBR bučnice mogu koristiti i u uslovima prevaziđenih ograničenja, ali su tada neophodna modelska ispitivanja. Tako se u literaturi [1] navodi iskustvo sa bučnicom tipa III na brani Ramganga (Indija). Ulazne brzine u ovu bučnicu bile su 42 m/s kada, saglasno USBR preporukama, nije dozvoljena upotreba blokova i pragova. Međutim, ispitivanja na hidrauličkom modelu su pokazala da su brzine vode na lokacijama blokova, postavljenih na približnom rastojanju $2,48 y_2$ od početka horizontalnog dna bučnice, bile manje od 15.0 m/s. Preliv funkcioniše već dugi niz godina, a nisu osmotrena nikakva oštećenja blokova u bučnici.

USACE preporučuje standardnu bučnicu, malo različitu od USBR bučnice. Standardna USACE bučnica se može koristiti za $F_1 \leq 9$, a standardni položaj blokova, visine $1,6y_1$, je na rastojanju $2y_2$, mereno od početka horizontalnog dna bučnice.

Grafikoni i jednačine za određivanje osnovnih hidrauličkih veličina (spregnute dubine, dužina skoka, položaj i dimenzije dodatnih elemenata u dnu) detaljno su prikazani u literaturi [1], [6], [7] i [18].

Međutim, za sve standardne bučnice poznate su samo hidrauličke dimenzije same bučnice i dodatnih elemenata u dnu, ali nisu standardizovane hidrodinamičke i kavitacione karakteristike toka koje nije moguće odrediti bez odgovarajućih modelskih ispitivanja. Kako su, pak, konstruktivna sigurnost bučnice i sigurnost od rizičnih kavitacionih oštećenja, pored učinka bučnice, najvažniji ciljevi projektovanja, modelska ispitivanja standardnih bučnica sa prinudnim hidrauličkim skokom su neophodna i ako su njihove hidrauličke dimenzije standardizovane i poznate.

LITERATURA

- [1] Khatsuria, P.M., *Hydraulic of Spillways and Energy Dissipators*, Marcel Dekker, 2005
- [2] Chanson, H., *Air-Water Gas Transfer at Hydraulic Jump with Partially Developed Inflow*, Water Resources, Vo. 29, No. 10, 1995
- [3] Urban, A.L., *Prediction of Total Dissolved Gas Concentration Downstream of Spillways*, XXX IAHR Congress, Thessaloniki, Greece
- [4] McCoy, A., *Tre-dimensional Hydrodynamic and Total Dissolved Gas Simulations of Rock Island Dam Spillway*, XXX IAHR Congress, Thessaloniki, Greece
- [5] Politano, M., Caprica P, Weber L., *Prediction of Total Dissolved Gas Downstream of Spillway using a multidimensional two-phase flow model*, Mecánica Computacional, Vol XXIV, Buenos Aires, Argentina, November 2005
- [6] Vischer, D.L., Hager W.H., *Energy Dissipators*, A.A. Balkema, Rotterdam, 1995
- [7] Vischer, D.L., Hager W.H., *Dam Hydraulics*, John Wiley & Sons, New York, 1998
- [8] Zirong, L.i dr., *Turbulence characteristics down stream of hydraulic jump*, XXII IAHR Congress, Lausanne, 1987

- [9] Abdul Khader, M.H. i dr., *Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump*, J. Hydraulic Reschears 12(4), 1974
- [10] Akbari, M.E i dr., *Pressure fluctuations on the floor of free and forced hydraulic jump*, Int. Conf. Hydraulic Modelling of Civil engineering Structures, C1, Coventry, 1982
- [11] Lopardo, R.A i dr., *Physical modeling on cavitation tendency for macro turbulence of hydraulic jump*, Int. Conf. Hydraulic Modeling of Civil Engineering Structures, C3, Coventry, 1982
- [12] Wood, J.R., *Air Entrainment in Free-surface Flows*, Hydraulic Structures design manual No. 4, A.A. Balkema, Rotterdam, 1991
- [13] Chanson, H. i dr., *Experimental Study of the air/water Shear flow in a hydraulic jump*, Int. J. of Multiphase flow, 26, (2000)
- [14] Chanson, H., *Bubbly flow structure in hydraulic jump*, European Journal of Mechanics, B/Fluids, 26(2007)
- [15] Gualtieri, C., Chanson H., *Experimental Analysis of Froude Number Effect on Air Entrainment in the Hydraulic Jump*, Environmental Fluid Mechanics, 5(3), 2007
- [16] Mossa, M., *On the oscillation characteristics of hydraulic jump*, Journal of hydraulic research, Vol 37, No. 4, 1999
- [17] Mossa, M., Petrillo, A., *A brief history of the jump of Bidone*, XXX JAHR congress, Thessaloniki, Greece, 2003
- [18] US BUREC, Engineering monograph No. 25, *Hydraulic design of stilling Basins and Energy dissipators*
- [19] Rajartnam, N., *Hydraulic Jumps*, Advance in Hydroscience 4, Academic Press, 1967
- [20] Ohtsu, J. i dr., *Hydraulic jump in sloping channels*, ASCE, Int. of Hyd. Engg. 117(7), 1991
- [21] Mossa, M. i dr., *Tail level effects on flow conditions at an abrupt drop*, Journal of Hydraulic Research, Vol 40 (4), 2002

APPLICATION OF THE RESULTS OF CONTEMPORANEOUS HYDRAULIC INVESTIGATIONS IN THE DESIGNS OF SPILLWAYS FOR LARGE DAMS (PART TWO)

by

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

Summary

In the second part of this article structures for energy dissipation are described, especially cases concerning stilling basins with classical and forced hydraulic jumps. First, results of current investigations concerning the determination of the shape and dimensions of such structures are summarized. Then, methods are proposed for the determination of the design discharge, in accordance with performance based design concept

(PBD). Finally, basic principles are outlined for the determination of air concentration and concentration of total dissolved gas (TDG) in the water.

Key words: classical hydraulic jump, forced hydraulic jump, aeration, total dissolved gas (TDG), design discharge, performance based design (PBD)

Redigovano 08.12.2007.