

## PRVI DEO

### MERNI OBJEKTI SA SUŽAVANJEM DNA KANALA UZ ZADRŽAVANJE ISTOG NAGIBA BOKOVA

autori: G. HAJDIN, S. KULAČIN, Č. MAKSIMOVIĆ, M. IVETIĆ

#### 1. OPIS I OSOBINE MERNOG OBJEKTA

Merni objekt je *mesto sa suženim presekom*: Suženi presek za *trapezni kanal* je *trapez* sa manjom širinom dna (granični slučaj je *trougao*), ali sa istim nagibom bokova — tokom postepenog sužavanja zadržava se isti nagib bokova.

*Pravougaoni kanal* sužava se u *pravougaonik* manje širine dna.

Uopšteno, svi merni objekti mogu se predstaviti trapeznim presekom — sl. 1.

Osnovne osobine takvog mernog objekta, koji se ovim radom predlaže, su sledeće (I do VI)

I — *Objekat se za svaki pojedinačni slučaj projektuje prema uslovima toga slučaja, uz usklađivanje sa tokom u kanalu.*

Treba se podsetiti da su sve cevi istog poprečnog preseka (kružnog) da se one rade fabrički, pa ugrađuju, pa se onda i merni objekti za njih (suženja) mogu takođe proizvoditi fabrički, pa se kupljeni uređaji ugrađuju u cevovod, a uređaj prati određena veza između proticaja i onoga što se meri (razlika pritisaka, odnosno piezometarskih kota). Prenosenje ovoga saznanja na kanale nije smotreno, jer su kanali različitog poprečnog preseka, oni se pojedinačno projektuju, otuda i različitost uslova za merne objekte.

Tipove mernih objekata sa propisanim dimenzijama teško je usklađivati sa pojedinim kanalima. Često je to nasilno ugrađivanje koje znatno remeti tok u kanalu, stvarajući veliko uzdizanje nivoa ispred objekta, ili se dobijaju nepouzdati merni podaci (na primer premalena visinska razlika nivoa, a od nje baš zavisi proticaj).

II — *Presek ispred suženja treba da bude oblikovan u trapezni presek — može da bude bilo kakav trapez, uključivši i pravougaonik.* Jasno je da se podrazumeva uslov o istom nagibu oba boka. Naša istraživanja ograničila su se na nagibe od 1:2 do vertikalnih bokova (pravougaonik), a praktični zadaci su gotovo uvek u tim granicama.

Presek ispred objekta je presek u kome se meri dubina, a u izvesnoj uzvodnoj deonici (daje se preporuka za tu dužinu — to je  $L_0$  na sl. 1), treba da bude isti presek, uz pravolinijsku trasu te deonice.

Ako je kanal celom dužinom u istom poprečnom preseku (a takvi su obično obloženi kanali), onda je taj presek ujedno i presek ispred suženja. Ako se radi o kanalu gde poprečni presek nije pouzdan (neobložen kanal) lako je naći trapezni presek koji mu se najbolje prilagođava i to je presek ispred objekta.

Ovo ukazuje da se *merni objekat uvek lako usklađuje sa kanalom.*

III — Mogućnost projektovanja mernog objekta za svaki pojedinačni kanal zahteva takvo oblikovanje objekta da se u preseku merenja i u suženom preseku obrazuje takvo strujanje koje je *hidraulički jasno*, pa se *jednostavno obezbeđuje*, upravo na koje se može primeniti Bernulijeva jednačina koja će povezati nevedena dva preseka. Ovo se postiže obrazovanjem pravolinijskog i paralelnog dolazećeg strujanja (što obezbeđuju dužine  $L_0$  i  $L_1$ ) dovoljna dugačka sužena deonica  $L_3$  uspostaviće kritičnu dubinu negde u suženju, a uz približno paralelno strujanje, a dužina  $L_2$  omogućava postepen prelaz. Zahtevi za dobijanje dobrog mernog podatka nameću potrebnu udaljenost  $L_M$ .

IV — *Meri se samo jedna dubina toka — dubina ispred suženja*, jer se ostvaruje *jednoznačna veza između te dubine i proticaja*. Praktična prednost nije samo u tome što se meri samo jedna dubina, a ne dve (ispred i u suženju), nego još više u tome što je kod uređaja gde se mere dve dubine, proticaj određen sa razlikom nivoa ispred i u suženju, a ta razlika je obično veoma malena i nepodobna za merenje — velika relativna greška je moguća. Navedena jednoznačnost obezbeđena je *nepotopljenošću struje u suženju*, tj. *neuticajem nizvodnih uslova na obrazovanje toka kroz suženje*.

Postepeno proširivanje iza suženja, uz postepeno spuštanje dna, na dužini  $L_4$  (sl. 1) olakšaće uslov za nepotopljenost, tj. smanjiće potrebnu razliku nivoa koju zahteva nepotopljenost. Treba odmah reći da je to spuštanje nivoa, pa i dna, ako se želi ista dubina ispred i iza objekta (za maksimalni proticaj), veoma maleno: reda veličine 10% merene dubine. Međutim, ta primamljiva mogućnost ostvarljiva je uz projektovanje mernog objekta prema uslovima pojedinačnog zadatka, a to je baš osnovno načelo za merne objekte koji se ovde preporučuju.

V — *Za postavljanje mernog objekta neophodan je uslov da je nailazeća struja u mirnom tečenju* tj. da je u preseku pred suženjem (mernom preseku) FROUDE-ov broj manji od jedinice, tj.

$$Fr = \frac{v^2 B}{g A} < 1 \quad (\text{Oznake objašnjene na početku poglavlja 2.})$$

Kod prelaznog dela kanala i tokova koji će se prilagoditi mernom objektu to se i ostvaruje. Burne tokove treba prethodno smiriti i u mirnom tečenju privesti mernom objektu.

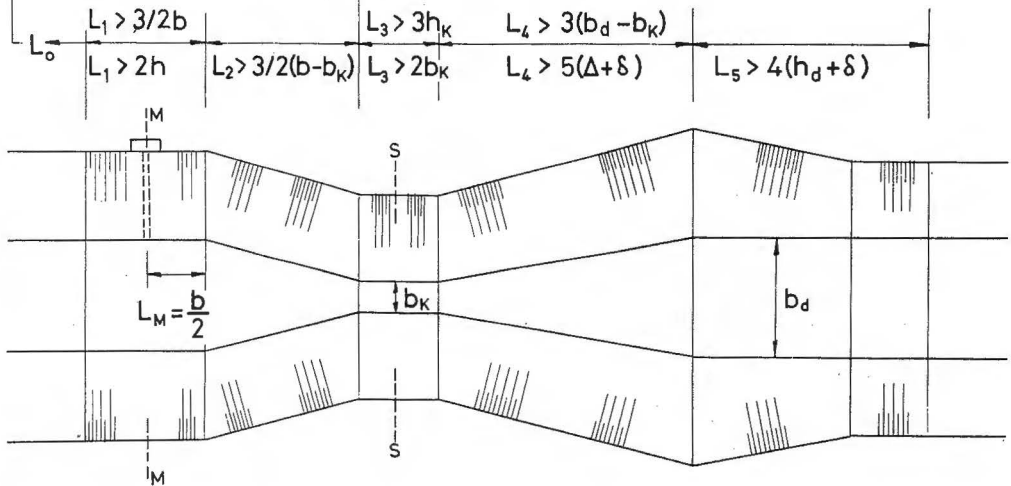
VI — Radi olakšavanja izgradnje, merni objekt je *oblikovan isključivo od ravnih površina*.

Podizanje dna između mernoga mesta i preseka u suženju svesno je izbegnuto — *nema praga* — pa se tako obezbeđuje nepromenljivost graničnih uslova, dok bi prag mogao izazvati taloženje nanosa, a time i promenu graničnih površina strujanja, koja može biti uticajna na vezu između merene dubine i proticaja.

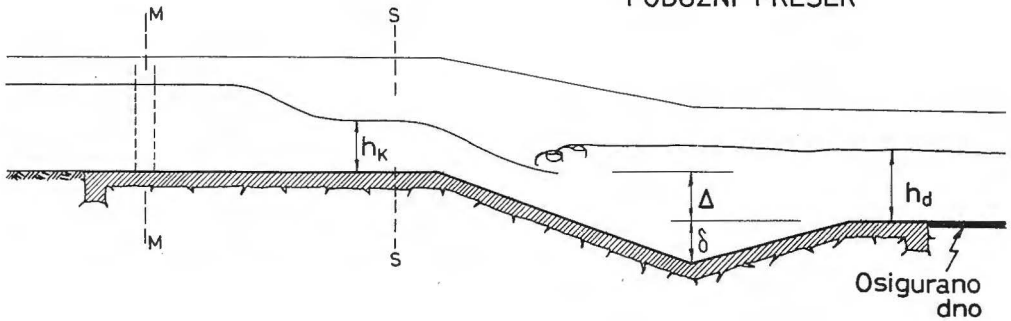
\* \* \*

$\left\{ \begin{array}{l} L_o > 5b \\ L_o > 5h \end{array} \right\}$  Korito uređeno sa poprečnim presekom kao M-M

OSNOVA

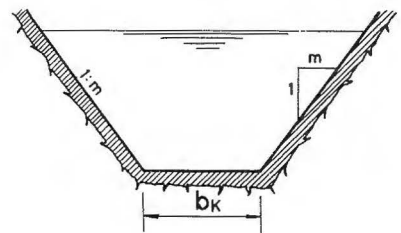
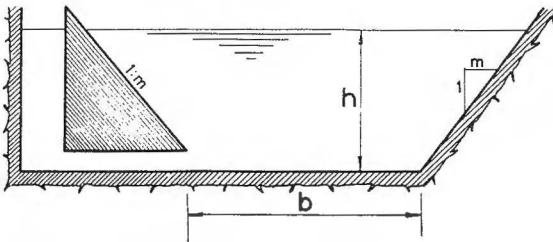


PODUŽNI PRESEK



PRESEK MERENJA M-M

SUŽENI PRESEK S-S



Slika 1. Prikaz mernog objekta

Istraživalo se ukupno na 13 modela (vidi PREGLED MODELA). Na nekima je menjano još i spuštanje dna, tako je bilo ukupno 19 različitih dispozicija mernog uređaja.

PREGLED MODELA

Model	Presek ispred suženja		Širina dna u suženju $b_k$ cm	$\frac{b_k}{b}$	Spuštanje dna $\Delta$ cm
	širina dna $b$ cm	nagib bokova $m$			
I	40	0 (pravou- gaonik)	32	0,8	4
II	20		16		4, 2 i 0
III	10		8		2, 1 i 0
IV	20		12	0,6	4
V	10		6		2
VI	20	1	10	0,5	2, 3
VII	20		0	0	5, 3 i 1
VIII	10		0 (trougao)		1,5
IX	5				0,5
X	20	1,5	2	0,1	5
XI	20	2	10	0,5	2
XII	13		2,6	0,2	1
XIII	10		0	0	0

## 2. VEZE IZMEĐU PROTICAJA I MERENE DUBINE

Uvode se oznake za *preseki ispred suženja*, gde se meri dubina  $h$ .

dubina . . . . .	$h$
nagib bokova . . . . .	$m$
širina dna . . . . .	$b$
širina vodene površine . . . . .	$B$
proticajni poprečni presek . . . . .	$A$
brzina . . . . .	$v$

gde je:

$$B = b + 2 m h \quad (1)$$

$$A = b h + m h^2 \quad (2)$$

U *suženom preseku*, gde je *kritična dubina*,  $h_k$ , oznake za sve veličine nose indeks „k“, pa se one pišu:  $h_k, b_k, B_k, A_k$  i  $v_k$ ; i u suženju ostaje isti nagib bokova ( $m$ ).

Ako se pretpostavi da je fluid *idealni* (izostavlja se gubitak energije), onda prethodne veličine za kritični presek nose još i indeks „id“ pa se pišu:  $h_{kid}, B_{kid}, A_{kid}$  i  $v_{kid}$ .

*Proticaj* koji se označava sa  $Q$ , dok onaj proticaj koji bi tekao da je fluid idealan nosi oznaku  $Q_{id}$ .

Povezivanjem stanja u presecima ispred i iza suženja, (dno je u oba na istoj koti) Bernulijeva jednačina, uz pretpostavku idealnog fluida daje:

$$h + \frac{v^2}{2g} = h_{kid} + \frac{v_{kid}^2}{2g} \quad (3)$$

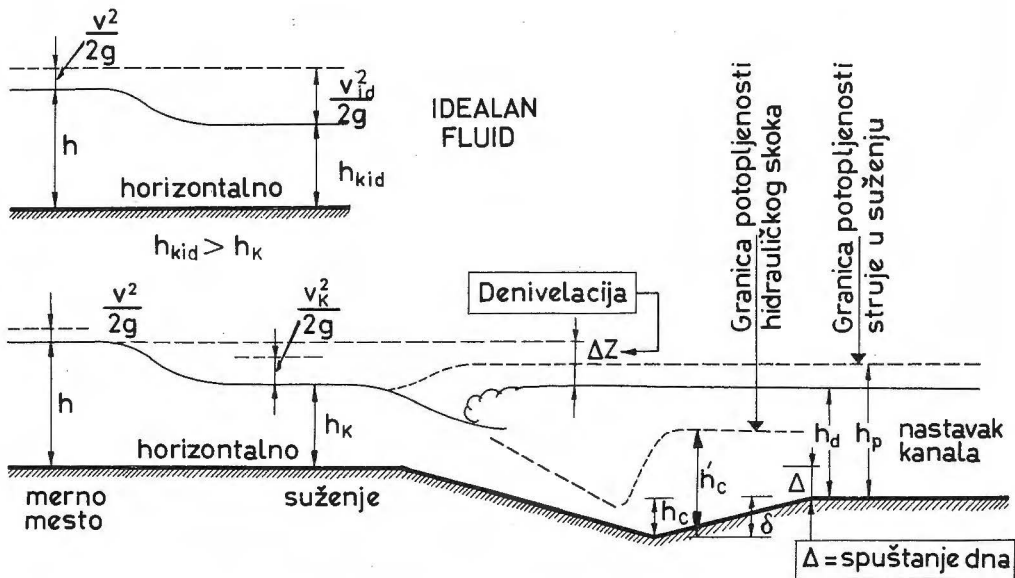
Na sl. 2. vidljivo je ovo izjednačavanje za idealan fluid (gornji crtež), uz navođenje da je ostvarena dubina manja od one koju bi dao idealan fluid ( $h_k < h_{kid}$ , jer je  $Q < Q_{id}$ ). Donji crtež na istoj slici poslužiće za olakšavanje hidrauličkih objašnjenja, koja će biti navođena kasnije (poglavljja 4. i 5.).

Zadovoljavanjem jednačine kontinuiteta dobija se

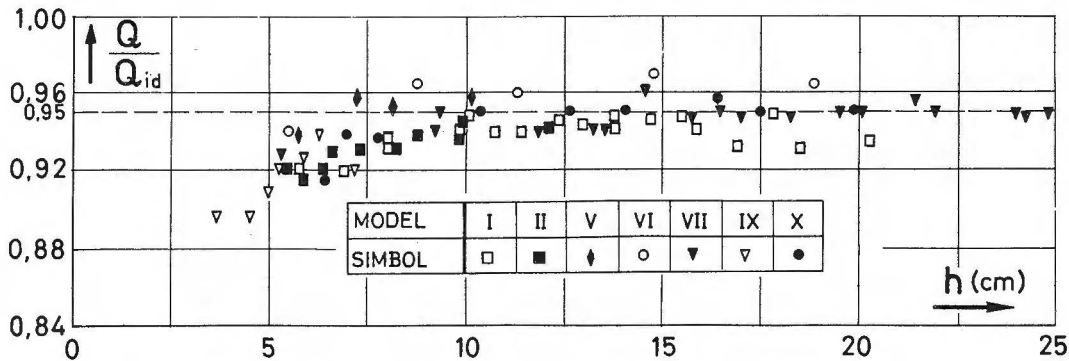
$$v A = v_{kid} A_{kid}$$

što iskorišćeno u jednačini (3) istu preobličava u

$$h = h_{kid} + \frac{v_{kid}^2}{2g} \left( 1 - \frac{A_{kid}^2}{A^2} \right) \quad (4)$$



Slika 2. Uz objašnjavanja jednačina koje iskazuju hidrauličke zakonitosti.



Slika 3. Odnos proticaja ( $Q$ ) prema proticaju za idealan fluid ( $Q_{id}$ ) u zavisnosti od merene dubine za merni objekat sa slike (1).

Uspostavljanjem kritičnog preseka ostvaruje se

$$\frac{v_k^2}{g} = \frac{A_k}{B_k} \quad (5)$$

pa se jednačina (4) može svesti na

$$h - h_{kid} = \frac{1}{2} \frac{A_{kid}}{B_{kid}} \left( 1 - \frac{A_{kid}^2}{A^2} \right) \quad (6)$$

ili

$$\frac{h}{h_{kid}} = \frac{1}{2} \frac{A_{kid}}{B_{kid} h_{kid}} \left( 1 - \frac{A_{kid}^2}{A^2} \right) + 1 \quad (7)$$

Jednačina (6) iskazuje zavisnost između  $h_{kid}$  i  $h$  (jer  $h_{kid}$  određuje  $B_{kid}$  i  $A_{kid}$ , a  $h$  određuje  $A$ ). To povezuje merenu dubinu  $h$  i proticaj  $Q_{id}$  koji bi tekao da je fluid idealan, jer je  $Q_{id}$  određeno sa  $h_{id}$ . Naime,  $Q_{id} = A_{kid} v_{kid}$ , pa se uz korišćenje (5), kad se napiše za idealni fluid dobija

$$Q_{id} = A_{kid} \sqrt{g \frac{A_{kid}}{B_{kid}}} \quad (8)$$

U stvarnim okolnostima teče nešto manji proticaj, nego uz pretpostavljanje idealnog fluida. Brojni opiti, sprovedeni na nizu modela, od kojih se na sl. 3 prikazuje samo jedan deo rezultata (jer bi se i ostali uklopili u isti zaključak), pokazuju da se može prihvatiti

$$Q = 0,95 Q_{id} \quad (9)$$

za  $h > 10 \text{ cm}$

tj. stvarni izmereni proticaj iznosi oko 95% od proticaja koji bi tekao da je fluid idealan.

Ograničenjem za merne dubine ostaje se u oblasti gde su inercijalni i gravitacioni uticaji premoćni, a uticaji viskoznosti i kapilarnosti zanemarljivi. U toj oblasti se i moglo sve podvrstiti pod jednu konstantu (0,95) dok za manje dubine, gde su uticaji viskoznosti znatni, to više ne važi.

Jednačine (6), (8) i (9), uz korišćenje (1) i (2), i odgovarajućih za  $A_{kid}$  i  $B_{kid}$ , određuju zavisnost

$$Q = Q(h)$$

tj. zavisnost između merene dubine  $h$  i proticaja  $Q$  koga merena dubina određuje.

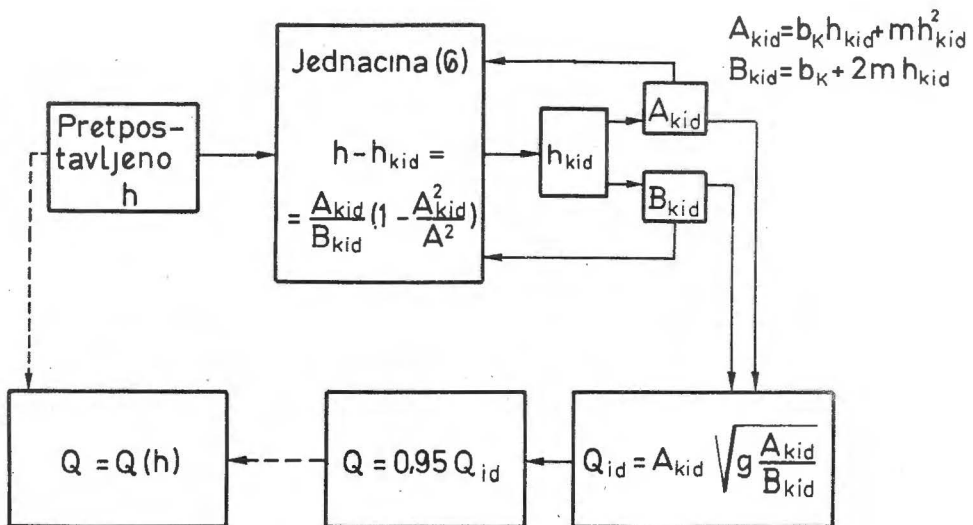
Računska shema za to određivanje, na osnovu pomenutih jednačina, za jedan slučaj objekta data je na sl. 4. To, razume se, zahteva pretpostavljanje suženja (upravo vrednosti za  $b_k$ ), i poznate sve podatke za presek ispred suženja. Međutim, postavlja se pitanje kako izabrati suženje pa da ono odgovara uslovima zadatka. Prihvatljivo je ono suženje koje će za maksimalni predviđeni protok davati maksimalnu dozvoljenu dubinu pred suženjem (a to je merna dubina), jer treba iskoristiti za merenje što je moguće veće dubine, ali bez opasnosti od izlivanja iz kanala. O ovoj prethodnoj proceni suženja koje dolazi u obzir biće reči u produžetku.

Vrednost izraza na desnoj strani jednačine (7) u svim zadacima nalaziće se između 1,2 i 1,4 što znači da se kao prva procena može uzeti

$$\frac{h_k}{h} = 0,7 \text{ do } 0,85 \quad (10)$$

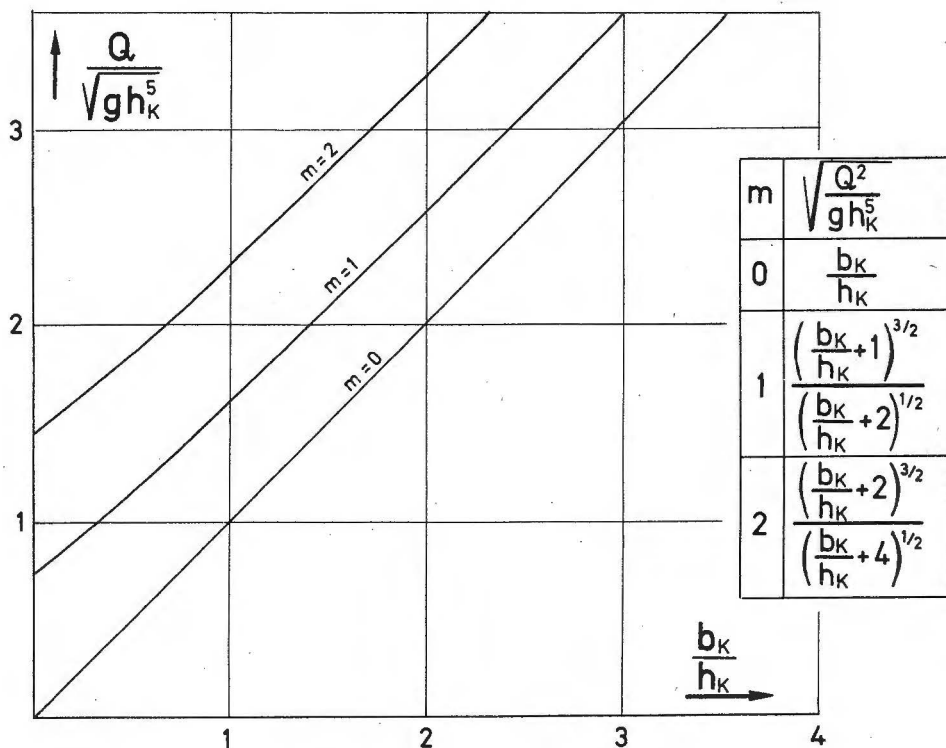
Do ovoga zaključka došlo se na osnovu ovakvog rasuđivanja:  $A_k/(B_k h_k)$  je jednako 1 kod pravougaonog preseka, a 1/2 kod trougaonoga (što su moguće granice), odnos  $A_k/A$  između preseka u suženju i ispred njega se može očekivati između 0,3 i 0,7, dok je između  $h_k$  i  $h_{kid}$  (za realan i idealan fluid), razlika zanemarljiva za ovu procenu.

Ostvariće se vrednosti bliže gornjoj granici datoj u (10), ako je suženi presek bliži trouglu i ako je odnos  $A_k/A$  veći.



Slika 4. Računska šema za određivanje zavisnosti proticaja od merene dubine





Slika 5. Grafikon za određivanje širine  $b_K$  u suženju na osnovu pretpostavljenog  $Q$  i  $h_{K-}$ .

Izraz (10) omogućava procenu kritične dubine  $h_K$  u suženju koja odgovara zahtevanoj mernoj dubini  $h$  (za maksimalni proticaj), a  $h_K$  onda određuje širinu  $b_K$  u suženju za taj proticaj i za dati nagib bokova ( $m$ ). To određivanje olakšava grafikon na sl. 5.

Navedeni grafikon je nacrtan na osnovu jednačine kritičnog preseka  $Q = \sqrt{g A_K^3 / B_K}$ , gde se  $A_K$  i  $B_K$  izraze preko  $b_K$ ,  $h_K$  i  $m$ , a potom sve svede na bezdimenzionalne veličine – dobija se

$$\frac{Q}{\sqrt{g h_K^5}} = \sqrt{\frac{\left(m + \frac{b_K}{h_K}\right)^3}{2m + \frac{b_K}{h_K}}} \quad (11)$$

Za pravougaono suženje ( $m = 0$ ) dobija se

$$\frac{Q}{\sqrt{g h_k^3}} = \frac{h_k}{b_k} \quad \text{tj.} \quad b_k = \frac{Q}{\sqrt{g h_k^3}}$$

izraz (11) prikazan je na sl. 5 kao

$$\frac{Q}{\sqrt{g h_k^3}} = f\left(m, \frac{b_k}{h_k}\right) \quad (12)$$

Treba napomenuti da se kod trapeznog kanala i za suženje na trougao ( $b_k = 0$ ) može dobiti  $h_k$  manje od onoga koje bi se moglo dopustiti, ovo znači da i trougaono suženje može dati manju dubinu pred suženjem od one koju kanal dozvoljava.

Rešenje koje se dobija sa grafikona na sl. 5. je približno, jer se pošlo od procene, od izraza (10). Međutim, od njega neće mnogo odstupati ono rešenje, koje će prema jednačinama (6), (8) i (9) – tj. prema sl. 4. dati tačno zahtevanu mernu dubinu  $h$  za zadati maksimalni proticaj – do njega će se lako doći, jer će približavanje početni već od približne vrednosti. Za konačno usvojeno rešenje računanjem prema shemi na sl. 4 dobiće se  $Q = Q(h)$ , tj. veza proticaja i merene dubine.

Skreće se pažnja da se za pravougaoni kanal, gde je  $A = bh$ ;  $A_{kid} = b_k h_{kid}$ , jednačina znatno uproštava i glasi:

$$\frac{h}{h_{kid}} = \frac{3}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{b_k}{b}\right)^2 \cdot \left(\frac{h_{kid}}{h}\right)^2$$

što znači da je  $h/h_{kid}$  funkcija isključivo od  $b_k/b$ . Nekoliko podataka, dobijenih računom postepenog približavanja daje sledeća tablica:

$b_k/b$	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
$h/h_{kid}$	1,491	1,462	1,409	1,315	1,0

\* \* \*

Naglašava se da se objašnjena veza između proticaja i merene dubine, obezbeđuje dužinama  $L_0$ ,  $L_1$ ,  $L_2$  i  $L_3$  (na sl. 1) a da se nizvodni deo objekta, (iza  $L_3$ ), oblikuje radi obezbeđenja jednoznačnosti te veze (nepotopljenosti struje u suženju) i radi smirenja struje iza suženja – o tome će biti reči u narednim poglavljima: 4. i 5.

Međutim, ako ima na raspolaganju dovoljno visinske razlike za spuštanje nivoa, odnosno dna, iza suženja, pa se ne mora štedeti na visini, nije nužno posebno oblikovanje radi obezbeđenja nepotopljenosti, pa se *merni objekat* može završiti zaključno sa dužinom  $L_3$ , dotle se treba pridržavati propisa sa sl. 1, a nadalje se objekat projektuje i gradi prema uslovima, koji odgovaraju pojedinačnom slučaju. Slikom 6 se prikazuju dva primera, gde se primenilo obrazloženo načelo za *skraćeni objekat*. Prvi primer je korišćenje stepenice (kaskade) za merni objekat, koji se inače gradi i zbog drugih razloga. Drugi primer je ušće kanala (u jezero, reku ili veći kanal) ili prelazak u tok znatno većeg poprečnog preseka.

### 3. OBEZBEĐENJE JEDNOZNAČNOSTI VEZE IZMEĐU PROTICAJA I MERENE DUBINE

Nastojalo se da bude prosto izražen (a time i pogodan za praktičnu upotrebu) uslov kojim se *obezbeđuje jednoznačna veza između proticaja i merene dubine* (bez uticaja nizvodnih uslova, tj. uz nepotopljenu struju u suženju). Prema sprovedenim eksperimentalnim rezultatima može se prihvatiti

$$\Delta Z = h - (h_d - \Delta) \geq \frac{1}{2} (h - h_k) \quad (13)$$

$\Delta Z$  je razlika nivoa ispred i iza suženja (vidi sl. 2), dok je  $\Delta$  spuštanje dna, pošto  $h_d$  označava dubinu iza suženja.

Prethodni uslov kazuje da se nivo iza suženja može popeti za polovinu visinske razlike između nivoa ispred i u suženju.

Treba dodati da ovaj uslov važi ako je proširivanje oblikovano kako je prikazano na sl. 1 tj. uz tamo date uslove za  $L_4$ . Nadalje, ako se iza suženja struja ne vraća približno na oblik ispred suženja, nego su nizvodni preseći mnogo veći prethodni uslov (3) ne važi, on se može preporučiti za  $A_k/A_d > 0,3$  ( $A_d$  je proticajni presek iza suženja, gde je dubina  $h_d$ , dok je  $A_k$  presek u suženju)

Jednačina (13) određuje spuštanje dna  $\Delta$  koje zahteva merni objekat – iz nje izlazi

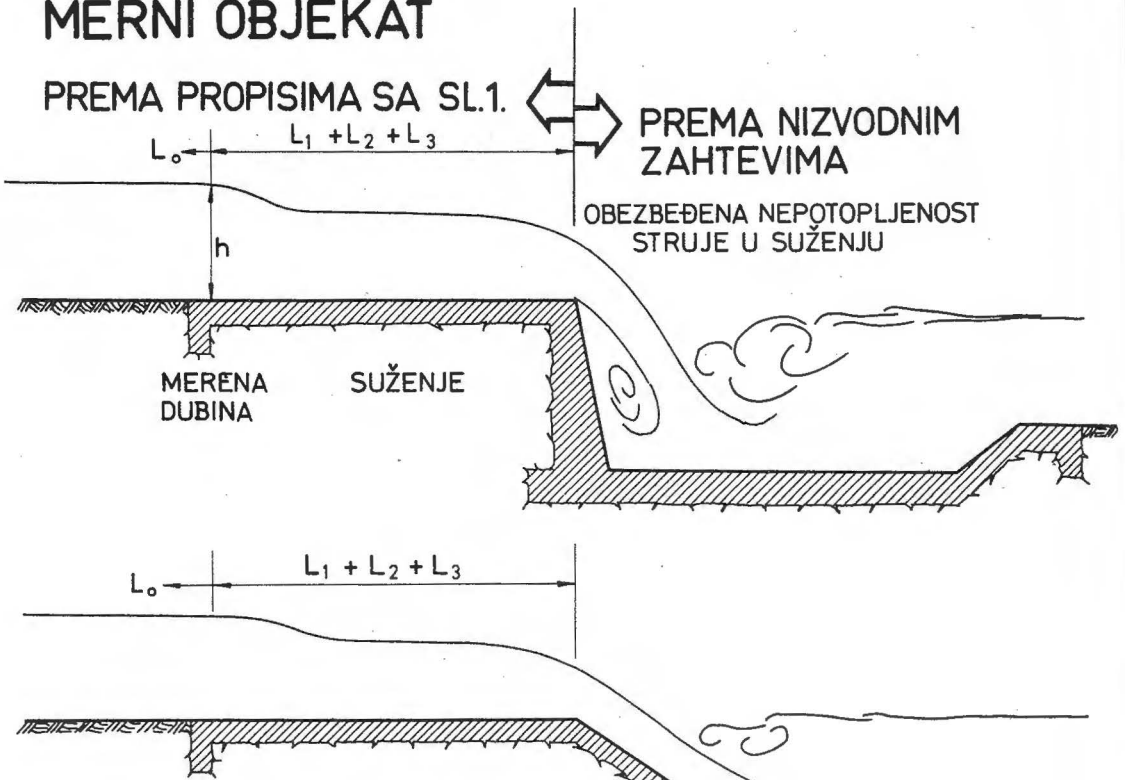
$$\Delta \geq h_d - 0,5 (h + h_k) \quad (14)$$

važi za  $\frac{A_k}{A_d} \geq 0,3$  ,

Odmah je napisano i malo pre obrazloženo ograničenje.

Ako bi se težilo ka složenom izrazu, koji bi obuhvatio celokupni geometrijski oblik proširivanja objekta, a morao bi uključiti i hrapavost (ona se mora procenjivati, a njen uticaj nije zanemarljiv, jer se obavlja postepeno proširivanje), ne bi se dobila osetna korist sa praktičnog stanovišta, naime ne bi se mnogo ublažio zahtev za spuštanjem dna, u odnosu na veoma prosti uslov koji je prethodno napisan. Uostalom, spuštanje nivoa je toliko maleno, da se zaista uvek može obezbediti jednoznačna veza između proticaja i merene dubine – razume se ako se objekat projektuje tako da se uskladi sa kanalom (a

# SKRAĆENI MERNI OBJEKAT



Slika 6. SKRAĆENI MERNI OBJEKAT.

Ako visinska razlika pouzdano obezbeđuje nepotopljenost struje u suženju, zahtevi za merni objekat se iscrpljuju zaključno sa dužinom  $L_3$  na sl.1., a nadalje se projektuje prema nizvodnim zahtevima. Pogodno je stoga skraćeni merni objekat projektovati u sastavu objekta druge namene. Dati su kao primeri: stepenica (kaskada) i ušće kanala.



Slika 7. Postizanje potrebnog spuštanja dna za merni objekat koji se naknadno ugrađuje u kanal.

to se ne može postići nasilnim uterivanjem tipiziranog objekta). Spuštanje nivoa  $\Delta Z$ , prema (13), uz korišćenje izraza (10) pokazuje da je

$$\Delta Z \geq 0,07 \text{ do } 0,15 h \quad (15)$$

tj. negde oko 10% dubine ispred suženja je denivelacija u suženju, pa da ono ostane nepotopljeno. Nikakvih teškoća nema da se to ostvari u projektovanju mernog objekta kada se on projektuje zajedno sa kanalom. Teškoće mogu nastati ako se objekat ubacuje u već sagrađeni kanal, ali se rešenje nalazi u podizanju dna ispred suženja za onoliko koliko će se kasnije spustiti, tj. za visinu  $\Delta$  (vidi sl. 7). Visina  $\Delta$  nije znatna, kako se malo pre pokazalo.

U nizu praktičnih slučajeva same okolnosti nude i veće visinske razlike, nego što je potrebno za uslov nepotopljenosti struje u suženju i treba koristiti takva mesta za postavljanje mernih uređaja.

Spuštanje dna  $\Delta$  prema izrazu (14) obično je najveće kada je proticaj najveći, mada to ne mora da bude u svim primerima, jer je zavisno od toga kakva je zavisnost dubine  $h_d$  iza suženja od proticaja  $Q$ . Ako je za velike proticaje  $\partial h_d / \partial Q$  maleno (dubina blago raste sa povećanjem proticaja), onda se može desiti da merodavno  $\Delta$  određuje neki proticaj manji od maksimalnog.

Korisno je grafički prikazati za svaki primer kako se menjaju dubine sa proticajem i uz to prikazati i granice potapanja struje u suženju. To je učinjeno u primeru koji sa daje na kraju (poglavlje 5).

\* \* \*

Za *skraćeni* merni objekat — sl. 6 — gde se ne oblikuje proširivanje iza suženja, nivo iza suženja ne sme da bude iznad nivoa u suženju, tj. potrebna denivelacija je

$$\Delta z > h - h_k \quad (16)$$

tj.  $\Delta > h_d - h_k$

Korisno je naglasiti već objašnjeno: skraćeni objekat znači skraćivanje, ali uz obezbeđenje nešto veće razlike nivoa.

Slučaj gde je  $A_k/A_d$  manje od 0,3 treba posmatrati kao poseban slučaj: tu je pogodno projektovati skraćeni objekat i njega iza suženog preseka rešiti prema okolnostima koje prate pojedinačni slučaj. Postepeno proširivanje ovde bi dovodilo do ogromnih dužina dela objekta iza suženja, a opet se ne bi pouzdano obezbedila nepotopljenost uz podizanje nivoa iza suženja (baš usled velikog stepena proširenja), pa bi se opet morao primeniti izraz (16), a ne (13), a onda nema razloga da se ne gradi skraćeni objekat.

#### 4. UMIRENJE STRUJE IZA SUŽENJA

Nepotopljenost struje, upravo kritično stanje u suženom preseku, proizvelo bi burno strujanje iza suženja. Da bi se to, ako je potrebno, sprečilo, treba obezbediti potapanje hidrauličkog skoka neposredno iza suženja. U tu svrhu predviđa se udubljenje  $\delta$  (vidi sl. 1 i sl. 2).

Hidrodinamička provera potopljenosti skoka je u uobičajenom postupku, koji se u posmatranom slučaju obavlja prema sledećem:

Dubina  $h_c$ , koja bi se u dnu udubljenja javila da nema potapanja hidrauličkog skoka, i njoj odgovarajuća brzina  $v_c$ , povezuju se Bernulijevom jednačinom sa dubinom  $h_k$  i brzinom  $v_k$  u suženju (zanemaruju se gubici energije)

$$h_c + \frac{v_c^2}{2g} = h_k + \frac{v_k^2}{2g} + \Delta + \delta \quad (17)$$

Iz ovoga se sračunava  $h_c$  (jer je  $v_c$  određeno sa  $h_c$ ). Dubina  $h_c$  koja se sa  $h_c$  spreže u hidraulički skok zavisi od  $\delta$ , pa se može sračunati.

Mora da bude zadovoljeno

$$h_d + \delta > h_c \quad (18)$$

Udubljivanje  $\delta$  ne predstavlja nikakvu teškoću, a njime se ne gubi visina, jer se dno ponovo podiže (rezultat spuštanja dna na objektu je samo ranije obrazloženo). Ako se  $\Delta$  obezbedi taman da zadovolji uslov (14), gotovo redovno biće dovoljno ako se uzme  $\delta = \Delta$ , a to je veoma maleno. U svakom slučaju treba proveriti da li je to dovoljno.

Međutim, tamo gde se objekat gradi uz veće spuštanje dna, jer je ono nametnuto iz drugih razloga, a sada se koristi za smeštaj mernog objekta (to je veoma poželjno sa stanovišta obezbeđenja nepotopljene struje u slapištu), ono može uzrokovati veće udubljivanje u slapištu, pa čak i predviđanje njegove znatne dužine. To će pokazati račun koji spada u osnovna hidraulička računanja. Međutim, negde se može dozvoliti da i neumirena voda teče nizvodno (naprimer, kada je kanal betoniran). Svaki pojedinačni slučaj ovde može da bude rešen onako kako je najpogodnije, dok se do preseka gde se završava suženje (završno sa dužinom  $L_3$  na sl. 1) moraju poštovati ograničenja za merni objekat data na sl. 1.

#### 5. PRIMER

Projektuje se kanal sa mernim objektom. Merodavni podaci za kanal su:

širina dna	$b = 4,0 \text{ m}$
nagib bokova	$m = 1$
maksimalni proticaj	$Q_{max} = 20 \text{ m}^3/\text{s}$
pad dna (ispred i iza suženja)	$I = 0,04\%$
hrapavost obloge, izražena Mannig-ovim koeficijentom neće preći vrednost	$n = 0,0135 \text{ m}^{-1/3} \text{ s}$

Iza suženja tečenje je jednoliko (normalna dubina). Ispred suženja jednoliko tečenje je poremećeno uticajem objekta, ali za maksimalni proticaj dubina ispred suženja treba da bude jednaka normalnoj dubini (da ne dođe do izlivanja iz kanala, a da se za merenje koriste što je moguće veće dubine).

### I Veza između dubine ( $h_d$ ) iza suženja i proticaja ( $Q$ )

Ova dubina je normalna, shodno navedenom uslovu, pa se proticaj  $Q$  računa prema:

$$Q = A_d \cdot R_d^{2/3} \cdot \frac{1}{n} \cdot I^{1/2} \quad (a)$$

$$A_d = b \cdot h_d + m \cdot h_d^2 = \text{proticajni presek} \quad (b)$$

$$R_d = \frac{A_d}{b + 2 h_d \sqrt{1 + m^2}} = \text{hidraulički radijus} \quad (c)$$

Sa datim podacima za  $b$ ,  $m$ ,  $n$  i  $I$ , jednačina (a) uz korišćenje (b) i (c) daje zavisnost  $Q = Q(h_d)$ .

Rezultati računa dati su tabelarno (tablica 1) i prikazani grafički – linija (I) na sl. 8.

Tablica 1

$h_d$ m	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
$Q$ m <sup>3</sup> /s	0,40	1,28	2,52	4,11	6,02	8,26	10,79	13,72	16,96	20,55

### II Određivanje suženog preseka

Za maksimalni proticaj od  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$  merena dubina treba da bude normalna, a ona iznosi  $h = 2,0 \text{ m}$ . Za ovu vrednost iz izraza (10) se kao prvo približenje može uzeti  $h_k = 1,5 \text{ m}$ . Iz grafikona (sl. 5), ili iz jednačine (11)

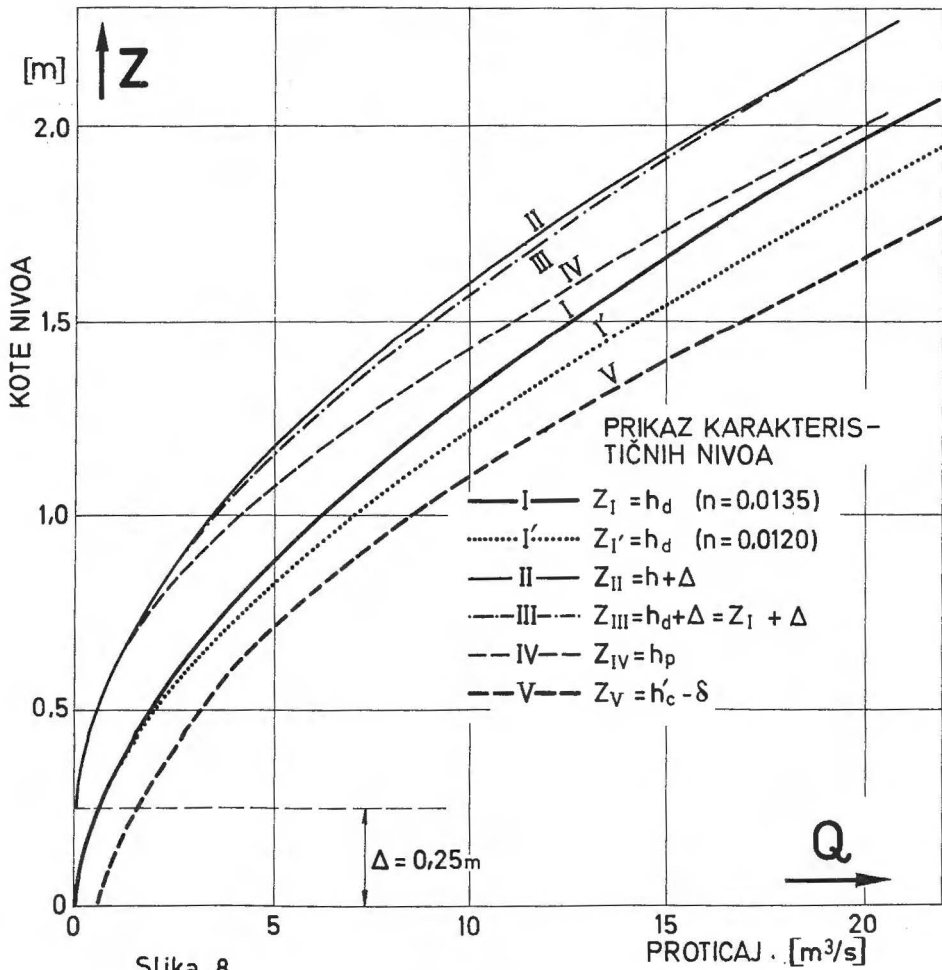
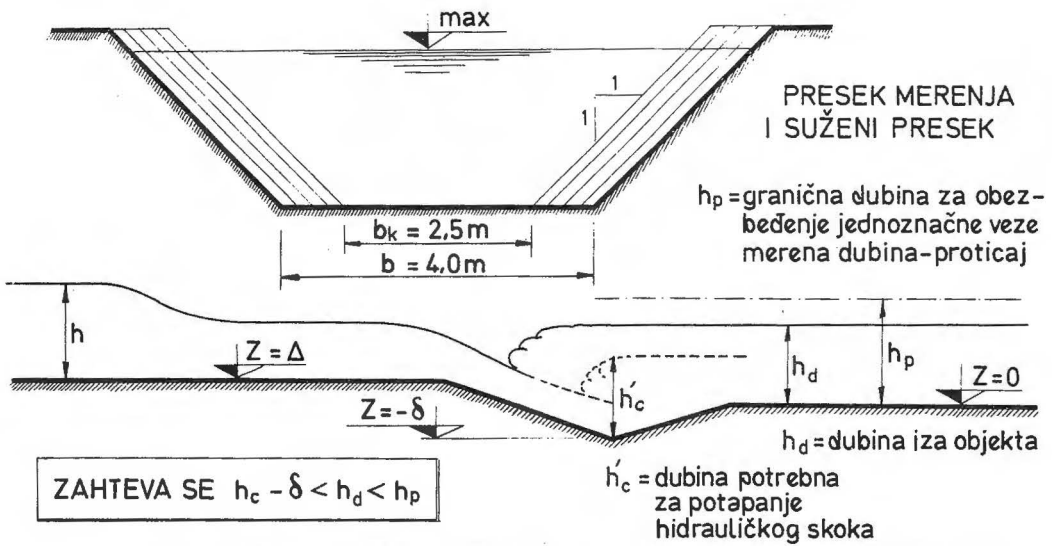
$$\text{za} \quad \frac{Q}{\sqrt{g h_k^5}} = \frac{20}{\sqrt{9,81 \cdot 1,5^5}} = 2,32$$

$$\text{dobija se} \quad \frac{b_k}{h_k} = 1,7$$

čemu odgovara otprilike

$$b_k = 2,5 \text{ m} \quad (d)$$

Tačan rezultat, prema jednačini (7) za  $b_k = 2,5 \text{ m}$  i  $h = 2,0$ ,  $Q_{id} = 21,945 \text{ m}^3/\text{s}$  daje  $Q = 20,848 \text{ m}^3/\text{s}$  pa se prethodno može prihvatiti.



Slika 8



### III Veza između merene dubine ( $h$ ) i proticaja ( $Q$ )

Rezultati računa prema jednačini (7) odnosno shemi na sl. 4 prikazani su u tablici 2. Grafikon funkcije  $h = h(Q)$  je linija (II) na sl. 8. Ta linija u stvari prikazuje nivo  $Z_{II} = h + \Delta$  (Dno ispred suženja je za  $\Delta = 0,25$  m više od dna iza suženja, a za ovo drugo uzeta je nulta kota,  $Z = 0$  – vidi sl. 8. Račun koji sledi obrazložiće spuštanje dna za  $\Delta = 0,25$  m, koliko je uzeto pri crtanju  $Z_{II}$ ).

Za maksimalni očekivani proticaj podešeno je da objekat omogućava jednoliko tečenje do njega (bez usporavanja). Ovde je objekat tako dobro usklađen sa tokom da je neosetno usporavanje za sve proticaje – to se zaključuje iz upoređenja linije (II) i isprekidane linije (III), koja predstavlja  $Z_{III} = h_d + \Delta$  ( $h_d$  je i ovde normalna dubina).

### IV Spuštanje dna ( $\Delta$ )

Prema izrazu (14) spuštanje dna iznosi:

$$\Delta = h_d - \frac{1}{2}(h + h_k) = 1,97 - \frac{1}{2}(1,96 + 1,52) = 0,23$$

U ovom računu uvrštena vrednost za dubinu  $h_d$  iza suženja proizlazi iz Tabele 1, a vrednost za merenu dubinu  $h$  ocenjena je na osnovu Tablice 2 – obe za proticaj  $Q = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Istom proticaju odgovara kritična dubina  $h_k = 1,52$  m, što je zaključeno iz zavisnosti  $h_k$  od  $Q$  koja je data sa niz podataka – podaci u istom redu Tablice 2. Ti podaci, u sklopu te tablice se odnose na  $h_{kid}$  i  $Q_{kid}$ . Međutim, jasno je da ti podaci, sami za sebe, predstavljaju opšte važeću jednoznačnu vezu između proticaja i kritične dubine, pa su ovde upotrebljeni i za proticaj koji se ostvaruje i za njegovu kritičnu dubinu.

Dobijena vrednost će se zaokružiti:

$$\Delta = 0,25 \text{ m}$$

Ovo spuštanje dna zadovoljava i ostale proticaje, a to je vidljivo iz sl. 3, gde je linija (IV) iznad linije (I) tj. ostvaruje se

$$h_p > h_d$$

$h_p$  je granična dubina za obezbeđenje nepotopljenosti struje u suženju (za obezbeđenje jednoznačne veze između merne dubine i proticaja).

Granična dubina  $h_p$  lako se sračunava po već pomenutom izrazu (14), koji daje kao graničnu vrednost za  $h_d$  tj.

$$h_p = \Delta + \frac{1}{2}(h + h_k)$$

Vrednosti za  $h_p$  u funkciji proticaja  $Q$  lako se sračunaju, koristeći podatke iz Tablice 2. Veza između  $Q$  i  $h_k$  određuje se kako je to malopre objašnjeno za maksimalni proticaj. Na osnovu takvog računa nacrtana je već pomenuta linija (IV) na sl. 8 koja predstavlja  $Z_{IV} = h_p = h_p(Q)$ .

Tablica 2.

$h$	$A$	$H_{kid}$	$A_{kid}$	$B_{kid}$	$Q_{id}$	$Q$
m	m <sup>2</sup>	m	m <sup>2</sup>	m	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s
0,10	0,410	0,072	0,180	2,640	0,147	0,139
0,20	0,840	0,145	0,383	2,790	0,444	0,422
0,30	1,290	0,220	0,598	2,940	0,845	0,803
0,40	1,760	0,296	0,828	3,090	1,342	1,275
0,50	2,250	0,372	1,068	3,244	1,919	1,823
0,60	2,760	0,448	1,327	3,400	2,596	2,466
0,70	3,290	0,528	1,599	3,556	3,358	3,190
0,80	3,840	0,608	1,890	3,716	4,221	4,009
0,90	4,410	0,687	2,189	3,874	5,155	4,897
1,0	5,000	0,767	2,506	4,034	6,186	5,877
1,1	5,610	0,848	2,839	4,196	7,314	6,948
1,2	6,240	0,930	3,190	4,360	8,546	8,119
1,3	6,890	1,011	3,550	4,522	9,852	9,359
1,4	7,550	1,095	3,936	4,690	11,296	10,731
1,5	8,250	1,177	4,328	4,854	12,799	12,159
1,6	8,960	1,259	4,732	5,018	14,395	13,675
1,7	9,690	1,344	5,166	5,188	16,148	15,341
1,8	10,440	1,427	5,604	5,354	17,956	17,058
1,9	11,210	1,511	6,061	5,522	19,887	18,893
2,0	12,000	1,596	6,537	5,692	21,945	20,848

## PRIMEDBA:

Dubina koja se meri tačno je određena u zavisnosti od proticaja. Ako se pouzdano zna da se veći proticaj od predviđenoga ne može ostvariti, neće ni merena dubina preći onu koja je sračunata. Pretpostavlja se da su takve okolnosti u prethodnom primeru: tamo se ne može desiti da teče više od predviđenih 20 m<sup>3</sup>/s.

Međutim, može se ostvariti manja hrapavost od predviđene (u hidrauličkim računima se nastoji da se bude „na strani sigurnosti“), a kanal se može puniti do vrha, pa će propuštati više od predviđenog maksimalnog (računato sa hrapavošću većom od ostvarene), ali to neće moći propuštati objekat (tu će doći do izlivanja, ili će se morati smanjiti proticaj). Tako merni objekat postaje „usko grlo“ proticaja. Prema tome, u takvim uslovima, merni objekat treba predvideti za proticaj koji daje najmanja očekivana hrapavost, iako se kanalska propusna moć, radi sigurnosti, računa sa najvećom očekivanom hrapavošću. Kada bi ovakve okolnosti bile moguće u razmatranom primeru, hrapavost sa kojom se računalo ( $n = 0,0135 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ ) najveća je očekivana (računa se „na strani sigurnosti“), dok bi najmanja očekivana mogla da bude i  $n = 0,012 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  pa bi kanal sa dubinom od 2 m jednoliko propuštao 23,1 m<sup>3</sup>/s, što znači da bi merni objekat trebalo podesiti za taj proticaj. Usvojeni merni objekat određuje merenu  $h$  i kritičnu  $h_k$  dubinu u suženju, koje ulaze u račun za spuštanje  $\Delta$  dna, a tu treba za dubinu  $h_d$  iza

suženja uzeti onu koja odgovara najvećoj očekivanoj hrapavosti, jer ona nameće najnepovoljnije uslove za obezbeđenje nepotopljenosti struje u suženju.

U primeru koji se obrađivao pretpostavljeno je jednoliko tečenje iza suženja. Ako to nije obezbeđeno, nego se mogu očekivati uticaji sa nizvodne strane, koji bi mogli podizati nivo, objekat neće pouzdano određivati proticaj, jer dolazi u sumnju nepotopljenost struje u suženju, tj. jednoznačnost veze između proticaja i merene dubine. Ta primedba otpada ako takvih uticaja nema. Treba napomenuti da se ovde računa sa najvećom očekivanom hrapavošću — tako je malopre objašnjeno i tako će ostvarene dubine moći biti samo niže (a nikako više) od računatih.

### V Smirivanje struje iza suženja

Pretpostaviće se da je udubljenje predviđeno da obrazuje slapište (vidi sl. 1 i sl. 2) jednako spuštanju dna, tj.  $\delta = \Delta = 0,25$ . To je veoma maleno, i ako se pokaže dovoljno, može se prihvatiti. Za poznati proticaj i ovako usvojeno  $\delta$  poznata je desna strana jednačine (17), pa se iz nje postepenim približavanjem dobija dubina  $h_c$  (sa njom je određena i pripadajuća brzina  $v_c$ ):

$$v_c = \frac{Q}{A_c} = \frac{Q}{b \cdot h_c + m h_c^2}$$

Dubina  $h_c$  bi se obrazovala da nema potapanja skoka, a do toga dolazi čim je dubina nametnuta sa nizvodne strane veća od  $h_c'$  koja se sa  $h_c$  spreže u hidraulički skok. Posle sračunavanja  $h_c$  za niz proticaja sračunavaju se i odgovarajuće vrednosti za  $h_c'$ , pošto ztv. „funkcija hidrauličkog skoka“ ima iste vrednosti za te dve dubine.

Primenjeni postupak spada u osnovna hidraulička računanja, a može se napisati sa:

$$h_c \rightarrow \emptyset(h_c) = \emptyset(h_c') \rightarrow h_c'$$

Treba se još podsetiti da za trapezni presek „funkcija skoka“ ima sledeći oblik:

$$\emptyset(h) = b \cdot h \frac{h}{2} + m \cdot h^2 \frac{h}{3} + \frac{Q^2}{g (b h + m h^2)}$$

Rezultati računa prikazani su grafički linijom (V)

$$h_c' - \delta = Z_v = Z_v(Q)$$

Iz sl. 8 se vidi da je

$$Z_V < Z_{I'} = h_d'$$

Ovde  $h_d'$  znači dubinu iza objekta uz najmanju očekivanu hrapavost ( $n = 0,012$ ) za koju je nacrtana linija (I') na sl. 8.

Prema tome obezbeđeno je potapanje hidrodinamičkog skoka što znači da će smirena struja izlaziti iz objekta.

## VI Završne napomene

Primer se odnosi na kanal u kome se sa kanalom projektuje i merni objekat — tu nema, kako se iz izloženoga vidi, nikakvih teškoća da se objekat uskladi sa kanalom. Merena dubina pred suženjem veoma malo se razlikuje od normalne dubine (objekat malo remeti nizvodni tok), spuštanjem dna za svega 25 cm obezbeđuje se nepotapanje struje u suženju, tj. jednoznačna veza merene dubine i proticaja.

\* \* \*

Kod već sagrađenih kanala, gde se merni objekat naknadno projektuje i gradi, ili kod prirodnih tokova, može doći do izvesnih teškoća pri rešavanju zadatka, ali su one prebrodive — rešenje se može naći, poštujući načela koja se za merni objekat daju.

Treba, pre svega, dobro proučiti uzvodne i nizvodne uslove, koji se nameću objektu i onda tražiti rešenje koje se najbolje prilagođava datim okolnostima (prihvata se maleno usporavanje, nastoji se da spuštanje dna ne bude preveliko). Ako ne treba štedeti na visini (na spuštanju dna) ili se čak ono prosto nameće, može se napraviti ono što se nazivalo „skraćeni objekat“.