

Uticaj inercije na hidraulički režim brodskih prevodnica

M. Jovanović

Gradjevinski fakultet Beograd

APSTRAKT. U ovom radu se govori o prevodnicama sa složenim podeonim hidrauličkim sistemima za punjenje i pražnjenje u kojima su izraženi inercijalni uticaji. Prikazuje se računski model pomoću koga se može predvideti veličina ovih uticaja. Na jednom primeru su demonstrirane mogućnosti primene ovog modela u praksi. Ključne reči: brodske prevodnice, hidraulički proračun, inercijalni uticaji

ABSTRACT. This paper deals with high-head ship locks with complex hydraulic filling and emptying systems in which the inertial effects are pronounced. A numerical model for prediction of those effects is presented. The possibilities of its application in practice are demonstrated by an example.

Key words: ship locks, hydraulic calculation, inertial effects

1 Uvod

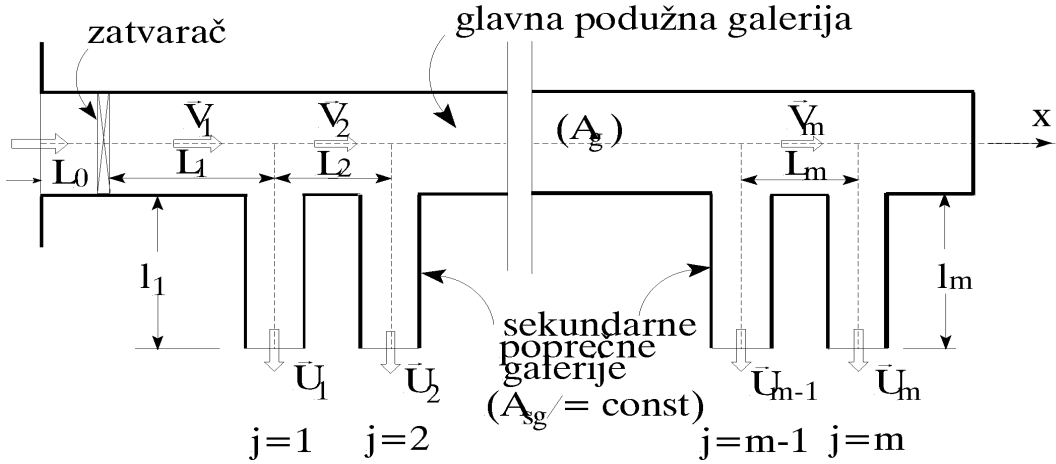
Prevodnice za savladjivanje velikih denivelacija (od oko 10 do 40 m) snabdevene su po pravilu podeonim hidrauličkim sistemima punjenja i pražnjenja. Ovi sistemi mogu biti veoma složeni, a najčešće se sastoje od dve glavne podužne galerije i niza sekundarnih poprečnih galerija. S obzirom na veliku dužinu galerija i značajnu zapreminu vode u njima, ispoljavaju se vrlo značajni inercijalni uticaji u početnoj i završnoj fazi punjenja/pražnjenja prevodnice. Za projektovanje je vrlo bitna procena ovih uticaja, kako bi se ostvario što ravnomerniji hidraulički režim i obezbedila maksimalna sigurnost brodova u komori tokom prevodjenja.

Hidraulička analiza brodske prevodnice najbolje se može obaviti paralelnom primenom matematičkog i fizičkog modela. Fizički model omogućava kalibraciju parametara računskog modela, a ovaj se zatim može koristiti za proveru niza varijantnih rešenja kako bi se (brzo i bez većih troškova) došlo do optimalne konfiguracije sistema (položaja i dimenzija glavnih distributivnih galerija i dimenzija i rasporeda sekundarnih galerija), kao i do optimalnih eksploatacionih uslova (režima rada zatvarača, trajanja prevodjenja i stabilnosti plovila u prevodnici).

U ovom radu se najpre ukratko opisuje originalan računski model, a zatim se kroz hipotetički primer demonstriraju mogućnosti primene ovog modela u praksi.

2 Osnovne jednačine

Na Slici 1 je shematski prikazana polovina simetričnog složenog podeonog sistema koji se sastoji od glavne podužne galerije i m sekundarnih poprečnih galerija. Na uzvodnom kraju glavne galerije nalazi se zatvarač. Poprečni presek galerija može biti kružni ili pravougaoni.



Slika 1: Shematski prikaz polovine složenog podeonog sistema sa glavnom podužnom galerijom i sistemom poprečnih sekundarnih galerija (izgled u osnovi).

Pretpostavlja se da je površina poprečnog preseka glavne podužne galerije (A_g) konstantna. (Ako to nije slučaj, u proračunu se umesto stvarnih, uvode „ekvivalentne“, ili računске dužine galerija).

Za podeoni sistem na Slici 1 se može napisati m jednačina održanja energije:
 $j=1$:

$$\frac{L_1}{g} \frac{dV_1}{dt} + \frac{l_1}{g} \frac{dU_1}{dt} + \left[\xi_{ul} + \xi_z + (\xi_t)_1 + (\xi_{31})_1 \right] \frac{V_1^2}{2g} + (\xi_{sg})_1 \frac{U_1^2}{2g} - H = 0 \quad (1)$$

$j=2$:

$$\frac{L_1}{g} \frac{dV_1}{dt} + \frac{L_2}{g} \frac{dV_2}{dt} + \frac{l_2}{g} \frac{dU_2}{dt} + \left[\xi_{ul} + \xi_z + (\xi_t)_1 + (\xi_{32})_1 \right] \frac{V_1^2}{2g} + \left[(\xi_t)_2 + (\xi_{31})_2 \right] \frac{V_2^2}{2g} + (\xi_{sg})_2 \frac{U_2^2}{2g} - H = 0 \quad (2)$$

⋮

ili, u opštem obliku:

$$\sum_{i=1}^j \frac{L_i}{g} \frac{dV_i}{dt} + \frac{l_j}{g} \frac{dU_j}{dt} + (\xi_{ul} + \xi_z) \frac{V_1^2}{2g} + \sum_{i=1}^j (\xi_t)_i \frac{V_i^2}{2g} + \sum_{i=1}^{j-1} (\xi_{32})_i \frac{V_i^2}{2g} + (\xi_{31})_j \frac{V_j^2}{2g} + (\xi_{sg})_j \frac{U_j^2}{2g} - H = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 2, 3, \dots, m), \quad (3)$$

gde su zavisno promenljive V i U - srednje profilske brzine u glavnoj podužnoj, odnosno u sekundarnoj poprečnoj galeriji i H - trenutna denivelacija. Inercijalni članovi $(L/g)dV/dt$ računaju se za svaki segment glavne galerije dužine L , a inercijalni članovi $(l/g)dU/dt$, za svaku sekundarnu (poprečnu) galeriju dužine l .

Koeficijenti lokalnih gubitaka: na ulazu ξ_{ul} , na zatvaraču ξ_z , na račvi ξ_{31} i ξ_{32} , linijskih gubitaka $\xi_t = \lambda \cdot L/(4R_g)$ (gde je R_g hidraulički radijus galerije, a λ , koeficijent trenja), kao i sumarni koeficijent svih gubitaka u sekundarnoj galeriji ξ_{sg} , predstavljaju parametre modela čije vrednosti zavise od konkretnog projektnog rešenja prevodnice. Te vrednosti se u preliminarnim proračunima mogu usvojiti na osnovu podataka iz literature ili podataka koji su utvrđeni za slične izvedene objekte, dok se za tačnije analize vrednosti navedenih parametara određuju merenjima na fizičkom modelu. (O koeficijentima lokalnih gubitaka biće još reči u nastavku).

Jednačinama (3) se pridružuje m jednačina kontinuiteta koje definišu usputnu promenu protoka u glavnoj galeriji (Q), odnosno protoke u sekundarnim galerijama (q):

$$q_j = Q_j - Q_{j+1} \quad (j = 1, 2, \dots, m-1) \quad (4)$$

$$q_m = Q_m \quad (5)$$

ili, drugačije napisano:

$$U_j = (V_j - V_{j+1})/\omega_j \quad (j = 1, 2, \dots, m-1) \quad (6)$$

$$U_m = V_m/\omega_m, \quad (7)$$

gde je: $\omega = A_{sg}/A_g \leq 1$ - odnos površine preseka poprečne i podužne galerije.

Sistem (3)+(6)+(7) se zatvara jednačinom kontinuiteta za komoru:

$$\frac{dH}{dt} + \frac{2A_g}{\Omega_k} \cdot V_1 = 0, \quad (8)$$

gde je Ω_k - površina vodenog ogledala u komori.

Početni uslovi datog problema se sastoje od vrednosti svih promenljivih u trenutku $t=0$. Ukupan broj nepoznatih je $2m+1$: $V_1, V_2, \dots, V_m, U_1, U_2, \dots, U_m$ i H . Da bi se ovaj broj smanjio, sistem se transformiše tako što se svaka jednačina „ j ” zamenjuje jednačinom „ $j - (j - 1)$ ” (Dehousse, 1985):

$$\begin{aligned} & \frac{L_j}{g} \frac{dV_j}{dt} + \frac{l_j}{g} \frac{dU_j}{dt} - \frac{l_{j-1}}{g} \frac{dU_{j-1}}{dt} + [(\xi_{32})_{j-1} - (\xi_{31})_{j-1}] \frac{V_{j-1}^2}{2g} + [(\xi_t)_j + (\xi_{31})_j] \frac{V_j^2}{2g} + \\ & + (\xi_{sg})_j \frac{U_j^2}{2g} - (\xi_{sg})_{j-1} \frac{U_{j-1}^2}{2g} = 0 \quad (j = 2, 3, \dots, m) \end{aligned} \quad (9)$$

s tim da prva jednačina ostaje nepromenjena. Zatim se iz sistema (1)+(9) eliminišu brzine u sekundarnim galerijama U_j pomoću jednačina kontinuiteta (6)-(7):

j=1:

$$\left(L_1 + \frac{l_1}{\omega_1} \right) \frac{dV_1}{dt} + \left(-\frac{l_1}{\omega_1} \right) \frac{dV_2}{dt} = \frac{1}{2} \left[\xi_{ul} + \xi_z + (\xi_t)_1 + (\xi_{31})_1 \right] V_1^2 -$$

$$-\frac{(\xi_{sg})_1}{2\omega_1^2}(V_1 - V_2)^2 - gH = 0 \quad (10)$$

$\underline{j=2,3,\dots,m-1}$:

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{l_{j-1}}{\omega_{j-1}}\right) \frac{dV_{j-1}}{dt} + \left(L_j + \frac{l_j}{\omega_j} + \frac{l_{j-1}}{\omega_{j-1}}\right) \frac{dV_j}{dt} + \left(-\frac{l_j}{\omega_j}\right) \frac{V_{j+1}}{t} = \\ & = -\frac{1}{2} \left[(\xi_{32})_{j-1} - (\xi_{31})_{j-1} \right] V_{j-1}^2 - \frac{1}{2} \left[(\xi_t)_j + (\xi_{31})_j \right] V_j^2 + \\ & + \frac{(\xi_{sg})_{j-1}}{2\omega_{j-1}^2} (V_{j-1} - V_j)^2 - \frac{(\xi_{sg})_j}{2\omega_j^2} (V_j - V_{j+1})^2 \end{aligned} \quad (11)$$

$\underline{j=m}$:

$$\begin{aligned} & \left(-\frac{l_{m-1}}{\omega_{m-1}}\right) \frac{dV_{m-1}}{dt} + \left(L_m + \frac{l_m}{\omega_m} + \frac{l_{m-1}}{\omega_{m-1}}\right) \frac{dV_m}{dt} = -\frac{1}{2} \left[(\xi_{32})_{m-1} - (\xi_{31})_{m-1} \right] V_{m-1}^2 - \\ & - \frac{1}{2} \left[(\xi_t)_m + (\xi_{31})_m \right] V_m^2 + \frac{(\xi_{sg})_{m-1}}{2\omega_{m-1}^2} (V_{m-1} - V_m)^2 - \frac{(\xi_{sg})_m}{2\omega_m^2} V_m^2. \end{aligned} \quad (12)$$

Sistem (10)-(12) zatvara jednačina kontinuiteta (8), tako da je ukupno $n = m + 1$ nepoznatih: V_1, V_2, \dots, V_m, H . Složenost rešavanja ovog sistema proizilazi iz njegove nelinearnosti, jer ne samo da u jednačinama figurišu kvadrati brzina, već i vrednosti koeficijenata lokalnih gubitaka na zatvaraču i na račvama takodje zavise od nepoznatih brzina. Problem se stoga mora rešavati iterativno.

3 Parametri modela

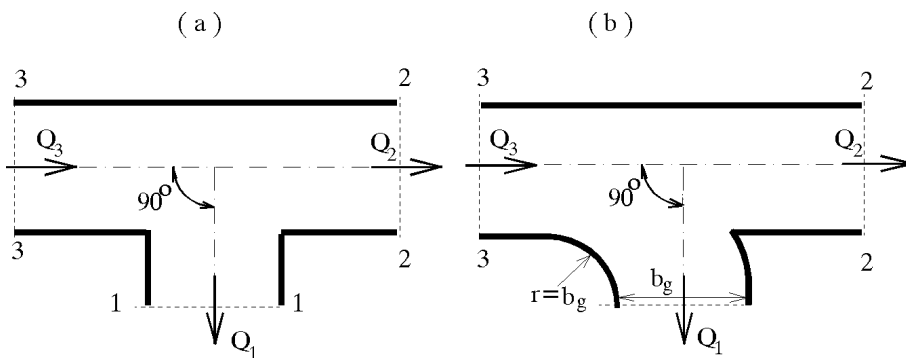
Zbog ograničenog prostora, ovde se govori samo o dva, za ovaj problem najznačajnija lokalna gubitka – na račvama i na zatvaraču.

Ako se usvoji obeležavanje prema Slici 2, gde se indeks „1” odnosi na tok u sekundarnoj poprečnoj, a indeksi „3” i „2”, u glavnoj podužnoj galeriji uzvodno i nizvodno od račve, koeficijenti lokalnog gubitka energije se mogu ovako definisati:

$$\xi_{31} = (E_3 - E_1) / \left(\frac{V_3^2}{2g}\right); \quad \xi_{32} = (E_3 - E_2) / \left(\frac{V_3^2}{2g}\right), \quad (13)$$

gde su E_1, E_2 i E_3 kote energije u posmatranim presecima, a V_3 - brzina u profilu uzvodno od račve. Oba gubitka se izražavaju u funkciji brzinske visine *uzvodnog* preseka. Vrednosti koeficijenata ξ_{31} i ξ_{32} zavise od više faktora:

- oblika poprečnog preseka galerija (kružni, pravougaoni);
- odnosa površine poprečnog preseka sekundarne i primarne galerije (A_1/A_3);
- ugla pod kojim je sekundarna galerija izvedena u odnosu na primarnu;
- oblikovanja prelaza iz glavne u sekundarnu galeriju (oštrovični, zaobljeni);
- trenutne vrednosti odnosa protoka u sekundarnoj i glavnoj galeriji (Q_1/Q_3).



Slika 2: Shematski prikaz račve: (a) kružni poprečni presek; (b) pravougaoni poprečni presek sa hidraulički oblikovanim prelazom iz podužne (glavne), u poprečnu (sekundarnu) galeriju.

U literaturi postoji veliki broj radova koji se bave lokalnim gubicima konvergentnih i divergentnih tokova. Od istorijskog značaja je sintezni prikaz eksperimentalnih istraživanja McNown-a iz 1954. godine. Korisni podaci se takodje mogu naći u knjigama Idelčika (1979) i Miller-a (1986).

Na Slici 3 su primera radi prikazane funkcije koeficijenata gubitka energije na računama pod uglom od 90° , za galerije kružnog poprečnog preseka.

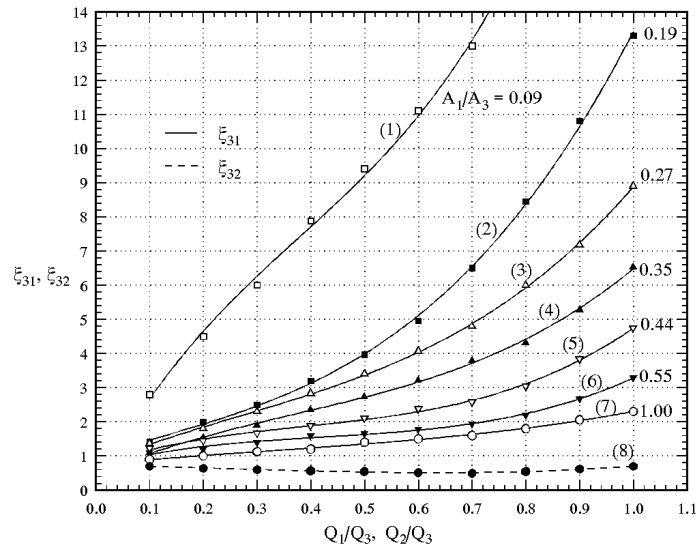
Koeficijenti lokalnog gubitka energije na zatvaraču zavise od tipa zatvarača i u literaturi postoje odgovarajući empirijski podaci. Na primer, za „obrnuto postavljene” segmentni zatvarač se koeficijent gubitka (ξ_z) može sračunati u zavisnosti od stepena otvorenosti (n_o) pomoću izraza (USCOE, 1975):

$$\xi_z(t) = \begin{cases} 0.04 \cdot 10^{1.56/n_o^2(t)} & \text{za } 0.0 < n_o < 0.2 \\ 10^{2.2-3.2 n_o} & \text{za } 0.2 \leq n_o \leq 1.0 \end{cases} \quad (14)$$

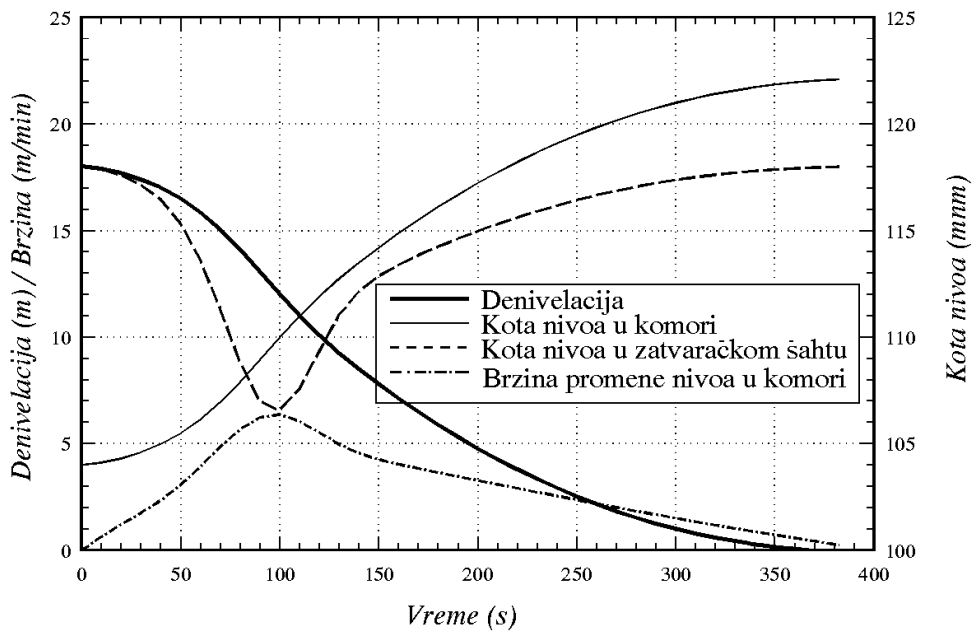
4 Primer primene modela

Razmatra se punjenje prevodnice dimenzija 200/25/4 m, sa kotama gornje i donje vode 118.00, odnosno 100.00 mmm (početna denivelacija 18 m). Sistem punjenja je simetrični složeni podeoni i sastoji se od dve podužne (glavne) galerije, dužine 160 m, kvadratnog poprečnog preseka 4.5×4.5 m, od kojih svaka sadrži 4 poprečne (sekundarne) galerije pravougaonog preseka 4.0×4.0 m, dužine $l=10$ m. Ukupna površina otvora na svakog poprečnoj galeriji je 16 m^2 . Dužina od ulaza u sistem do zatvaračkog šahta iznosi $L_o=60$ m. Segmentni zatvarač se podiže konstantnom brzinom do potpune otvorenosti preseka ($n_o=100\%$), u periodu od $t_z=320$ s.

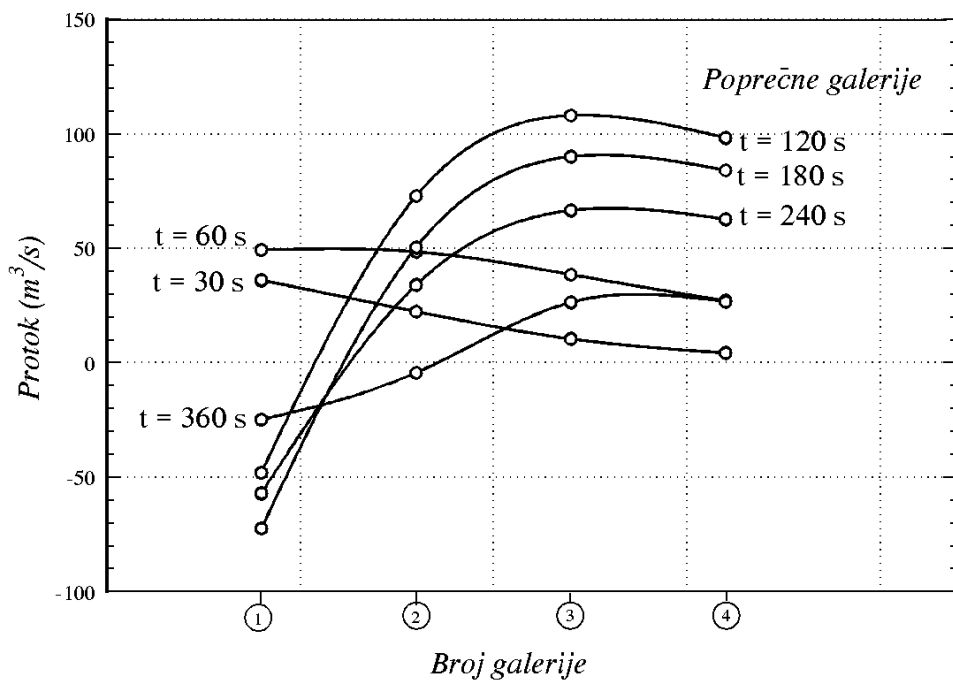
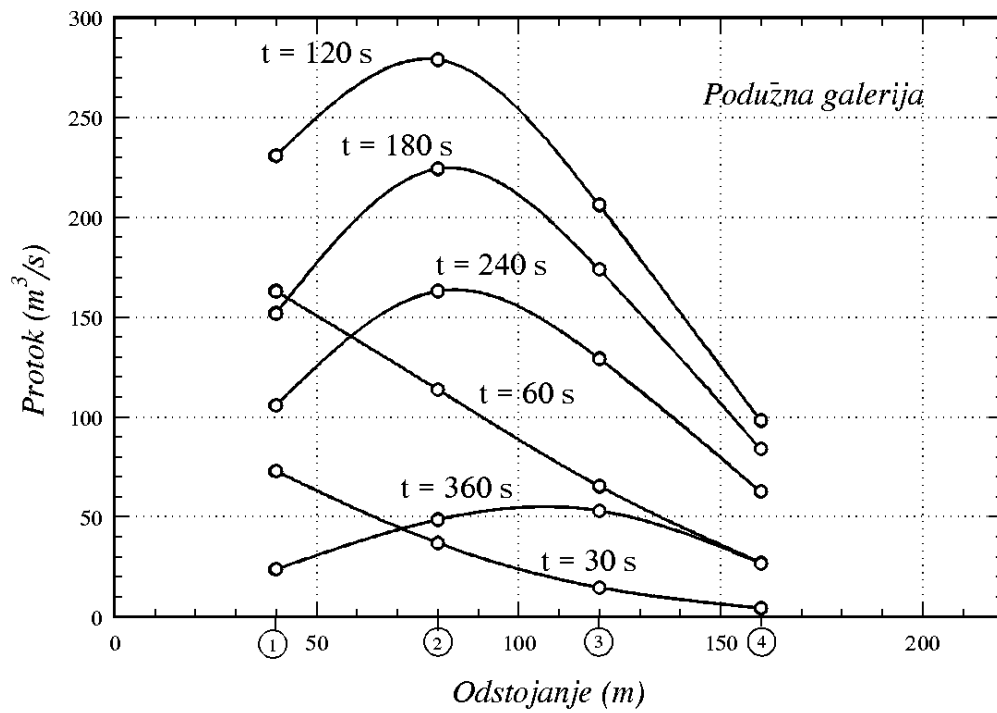
Na Slici 4 su dati nivogrami i brzina rasta nivoa u komori, dok je na Slici 5 prikazan sračunat raspored protoka duž glavne podužne galerije i po poprečnim galerijama tokom punjenja komore.



Slika 3: Funkcije koeficijenta lokalnog gubitka energije na rađvi za galerije kružnog poprečnog preseka (Idelčik, 1979). Može se primetiti da su ovi koeficijenti funkcije dve promenljive: odnosa površina poprečnih preseka A_1/A_3 i odnosa trenutnih protoka Q_1/Q_2 , odnosno Q_2/Q_2 . Bilinearnom interpolacijom se brzo računaju vrednosti



Slika 4: Rezultati proračuna: nivogrami i brzina punjenja komore



Slika 5: Rezultati proračuna: raspored protoka duž podužne galerije i po poprečnim galerijama

Na Slici 6 je prikazan raspored intenziteta inercijalnih članova duž glavne podužne galerije i po sekundarnim poprečnim galerijama, kao i relativan uticaj inercije u odnosu na denivelaciju i gubitke. Može se konstatovati:

(i) U početnom periodu punjenja ($0 < t < 120$ s), koji predstavlja $1/3$ vremena punjenja prevodnice, dominiraju uticaji inercije vodene mase u glavnim galerijama i lokalnih otpora zatvarača. Kombinovano dejstvo ovih uticaja *usporava* punjenje komore. U ovom periodu, od 18–10 m denivelacije, na inerciju otpada 0–2.5 m (0–18%, u proseku oko 10%), a ostatak u najvećoj meri (do $t \approx 80$ s) čini gubitak na zatvaraču. Uticaj zatvarača se oseća do $t=120$ s, što približno odgovara polovini trajanja njegovog podizanja ($t < t_z/2=160$ s).

(ii) U središnjoj fazi punjenja ($120 < t < 180$ s) kada se javljaju maksimalni protoci u sistemu, vrednosti inercijalnih članova su relativno male (maksimalno 10% u odnosu na denivelaciju, u proseku 7%), tako da se može smatrati da u ovom periodu (koji predstavlja oko $1/6$ vremena punjenja), fenomen ima neinercijalni karakter. Može se primetiti da se znak zbira inercijalnih članova menja u trenutku $t=120$ s; dok je u početnom periodu inercija usporavala punjenje, sada počinje da ga *ubrzava*. Zbir inercijalnih članova od ovog trenutka ima skoro konstantnu vrednost koja je znatno manja od vrednosti u početnoj fazi (Slika 6).

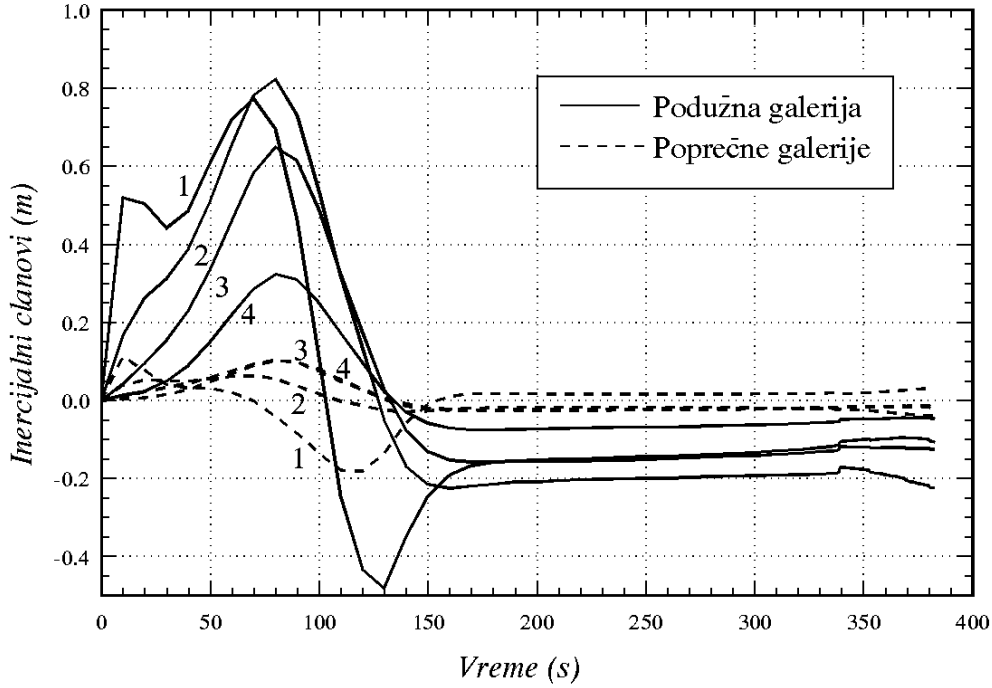
(iii) U završnom periodu punjenja ($t > 180$ s) uticaj inercije postaje sve značajniji sa opadanjem denivelacije. Na primer, u trenutku $t=260$ s, vrednost zbira inercijalnih članova iznosi oko 25% vrednosti denivelacije, u trenutku $t=300$ s oko 50%, a u trenutku $t=330$ s, oko 100%. Od trenutka kada vrednost inercijalnih članova premaši vrednost denivelacije, dolazi do oscilacija vodene mase (slično fenomenu vodostana), koje traju izvesno vreme nakon prestanka punjenja, sve dok otpori u sistemu (pre svega trenje) ne zaustave ovaj proces.

5 Zaključci

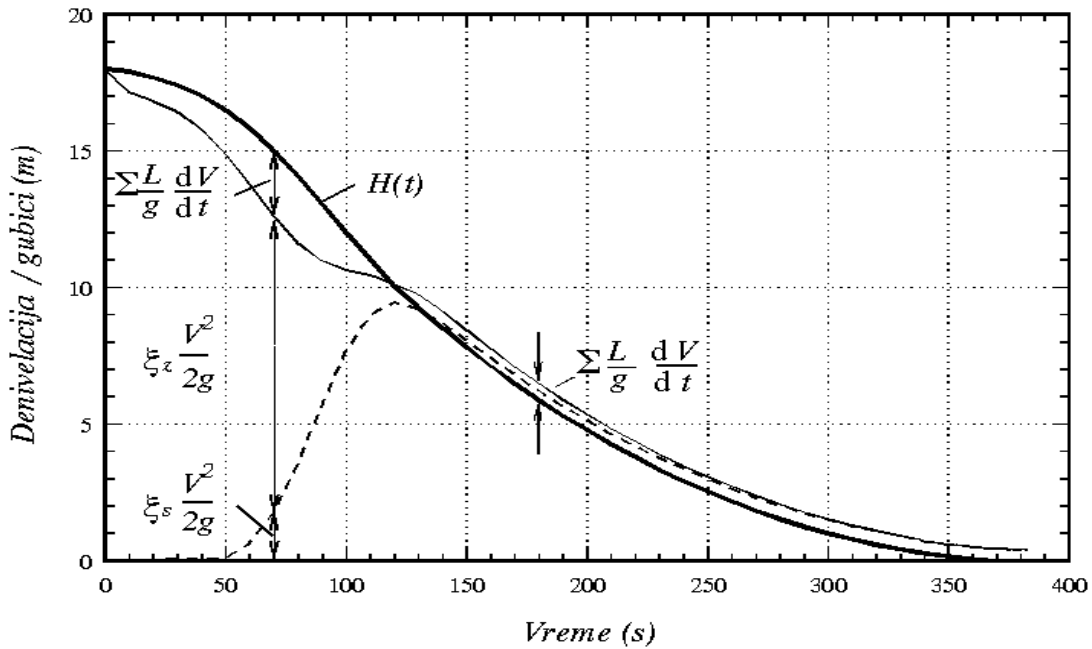
1. Hidraulički režim u složenim podeonim sistemima brodskih prevodnica može se vrlo efikasno analizirati primenom računara. Mogu se sračunati funkcije rasporeda protoka, brzina i intenziteta inercijalnih članova u svim galerijama, zatim hidrogrami i nivogrami, pritisci u izabranim (osetljivim) delovima sistema, brzina podizanja nivoa u komori, itd. U analizi se mogu razdvojiti uticaji linijskih i pojedinih lokalnih gubitaka energije, pri čemu su od posebnog interesa oni na račvama i na zatvaraču.

2. U početnom periodu koji zahvata trećinu vremena punjenja komore, odnosno polovinu trajanja otvaranja zatvarača (linearni zakon otvaranja), inercija vodene mase u podužnim galerijama, kao i zatvarači u njima, imaju dominantan uticaj na hidraulički proces, usporavajući ga. Uticaj zatvarača kod sistema razmatranog tipa naglo slabi već pri stepenu otvorenosti $n_o = 30 - 40\%$, a ima vrlo mali uticaj za $n_o > 50\%$.

3. U središnjoj fazi koja obuhvata $1/6$ vremena punjenja, a u kojoj se javljaju maksimalni protoci u sistemu, uticaj inercije počinje da deluje u pravcu ubrzanja hidrauličkog procesa. Vrednosti inercijalnih članova su skoro konstantne i znatno manje od onih u početnoj fazi.



(a)



(b)

Slika 6: Rezultati proračuna: (a) raspored intenziteta inercijalnih članova u glavnoj galeriji i po sekundarnim galerijama; (b) intenzitet inercijalnog uticaja u glavnoj galeriji $\sum(L/g)dV/dt$ u odnosu denivelaciju H , gubitak na zatvaraču $\xi_z V^2/(2g)$ i ostale gubitke u sistemu $\xi_s V^2/(2g)$

4. U završnom periodu (druga polovina trajanja punjenja prevodnice), uticaj inercijalnih članova se povećava sa smanjenjem denivelacije i postaje dominantan pri kraju punjenja kada izaziva oscilovanje vodene mase koje traje sve dok ga otpori u sistemu ne priguše.

5. Analiza inercijalnih uticaja je od ključnog značaja za projektovanje „ekviinercijalnih sistema” koji obezbeđuju ravnomernost punjenja/praznjenja prevodnice i obezbeđuju punu sigurnost plovila u njoj. Uzgred se napominje da računski modeli omogućavaju i procenu kavitacione ugroženosti u zoni zatvarača, na osnovu čega se određuje visinski položaj glavnih podužnih galerija, što je takodje jedan od ključnih problema u projektovanju prevodnica.

Literatura

1. Alméras, P., *Quelques problèmes posés par le remplissage des écluses de navigation*, La Houille Blanche, Sept-Oct. 1948.
2. Dehousse, N., *Les écluses de navigation*, Université de l'Etat à Liège, 1985.
3. Idelchik, I.E., *Coefficients de pertes de charge singulières*, Dunod, 1979.
4. McNown, J.S., *Mechanics of Manifold Flow*, Transactions, ASCE, Vol. 119, Paper No. 2714, 1954.
5. Miller, D.S., *Internal Flow Systems*, BHRA Fluid Engineering, 1986.
6. Mihailov, A.B., *Limitation of Hydraulic Regime and Time of Filling High-Head Ship Lock Chambers by Standard Navigation Regulations Requirements*, XVII. IAHR Congress, Baden-Baden, 1977.
7. Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC), *Final Report of the International Commission for the Study of Locks*, Brussels, 1987.
8. Priset, E., Gagnon, A., *High Lift Lock: Some Hydraulic Problems and Solutions*, Journal of the Waterways and Harbors Division, ASCE, Vol. 90, No. WW4, Nov. 1964.
9. US Army Corps of Engineers, *Hydraulic Design of Lock Culvert Valves*, EM-1110-2-1610, 1975.