

Dr Zoran Ristić,
pukovnik, dipl. inž.
Šc Slobodan Ilić,
kapetan I klase, dipl. inž.
Vojnotehnička akademija VJ,
Beograd

UTICAJ KOEFICIJENTA OTPORA PROTICANJU TEČNOSTI NA PROMENU SILE KOČENJA U HIDRAULIČNIM KOČNICAMA ARTILJERIJSKIH ORUĐA

UDC: 62-592.2.000.532.5:623.41/.42

Rezime:

Prema modelu hidrauličnog funkcionisanja kočnice trzanja artiljerijskog oruđa za vreme opaljenja, u radu je razmatran koeficijent otpora proticanju tečnosti. Na osnovu režima strujanja tečnosti određene su relacije za koeficijente otpora pri tzv. osnovnom i dopunskom proticanju tečnosti. Na osnovu dobijenih vrednosti eksperimentalnih rezultata za pritisak tečnosti i brzinu kretanja klipa u fazi trzanja, određena je zakonitost promene koeficijenta otpora proticanju. Analiziran je uticaj koeficijenta otpora proticanju tečnosti na veličinu ukupne sile hidrauličnog kočenja kretanja trzajuće mase artiljerijskog oruđa.

Ključne reči: strujanje tečnosti, koeficijent otpora, hidraulična kočnica, sila kočenja, pritisak, trzanje, artiljerijsko oruđe.

INFLUENCE OF THE FLOW COEFFICIENT RESISTANCE TO THE FLUCTUATION OF TOTAL BRAKING FORCE IN HYDRAULIC BRAKES ARTILLERY WEAPON

Summary:

In this paper, the fluid flow coefficient is considered according to the model of hydraulic functioning of the artillery weapon recoil brake during firing process. The relations for coefficient of hydraulic resistance during primary and additional fluid flow are determined on the basis of the form of the flow through bores. The law of change of flow resistance coefficient is determined on the basis of experimental values for fluid pressure and piston velocity moving in the recoil phase. The Influence of the flow resistance coefficient on the fluctuation level of the total braking force of artillery weapon recoil mass was analyzed.

Key words: fluid flow, flow resistance coefficient, hydraulic brake, braking force, pressure, recoil braking, artillery weapon.

Uvod

Matematički model hidraulične kočnice (HK) trzanja na artiljerijskim oruđima zasnovan je na klasičnim zakonima hidromehanike. U hidrodinamičkom smislu ponašanje HK karakteriše nestacionarno kretanje tečnosti kroz protočne

otvore u cilindru kočnice, sa vrlo nestabilnom fazom laminarnog i turbulentnog tečenja. S obzirom na to, neke izvedene matematičke relacije, na osnovu opšte teorije hidromehanike, mogu se iskoristiti samo za približnu ocenu pojava koje se javljaju u HK. Prema klasičnoj teoriji [1], problem hidraulične kočnice se vrlo često

svodi na laminarno ili turbulentno tečenje kroz cevi ili dijafragme. Sve zavisi od toga da li se otvor za proticanje tečnosti u klipnu HK razmatra kao „ceva“ ili samo „otvor“ u tankoj pregradi. U opisivanju problema ponašanja HK za vreme opaljenja projektila autori [2, 3] su, zavisno od pristupa, uvodili određena pojednostavljenja, tako da su dobijene relacije za silu hidrauličnog otpora kočnice $F_k(x)$ i parametre kočnice bile manje ili više složene.

Za model HK trzanja sa kontraklijpnjačom vretenastog tipa, prema [2], sila hidrauličnog otpora kočnice definiše se izrazom:

$$F_k = \frac{\rho}{2} k_1 \cdot \frac{A_x^3}{a_x^2} v_r^2 K_\beta \left(K_\beta - \frac{\mu a_x}{A_x} \right)^2 + \frac{\rho}{2} k_2 \cdot \frac{a_1^3}{a_n^2} v_r^2 + \bar{\beta} p_1 \left(V \frac{dp_1}{dx} - \frac{1}{2} A_x p_1 \right) \quad (1)$$

gde je:

ρ – gustina tečnosti,

k_1, k_2 – koeficijenti otpora proticanju tečnosti kroz protočne otvore u kočnici, $K_{1,2}$ – obuhvataju kontrakciju poprečnog preseka struje (μ), neravnomernost brzina, tečnosti po preseku struje (δ_i) koeficijent unutrašnjeg trenja tečnosti (ξ_i), itd.,

a_1 – površina preseka šupljine klipnjače, a_n – najmanja površina prstenastog otvora u šupljini klipnjače,

a_x – površina promenljivog otvora između regulacionog prstena i vretena,

A_x – efektivna površina klipa,

V – zapremina stuba tečnosti,

$K_\beta = 1 + \bar{\beta} p_1 - \bar{\beta} l_0 \frac{dp_1}{dx}$ – faktor stišljivosti tečnosti [1],

v_r – brzina trzanja,

p_1 – pritisak tečnosti u cilindru kočnice (prostor iza klipa).

Ako se stišljivost tečnosti zanemari, usvaja se da je $\beta = 0$ i $K_\beta = 1$, tako da sila hidrauličnog otpora kočnice prema (1) postaje:

$$F_k = \frac{\rho}{2} k_1 \cdot A_x \frac{(A_x - \mu a_x)^2}{a_x^2} v_r^2 + \frac{\rho}{2} k_2 \frac{a_1^2}{a_n^2} v_r^2 \quad (2)$$

Prema [2], dalje se definišu izrazi za pritisak tečnosti p_1 , silu pritiska tečnosti na dno cilindra kočnice F_d i kontraklijpnjaču F_{kk} , kao i ukupnu silu reakcije oslonca cilindra kočnice. Pri tome oblik izraza kojim se određuje vrednost sile otpora kočnice zavisi od tipa njenog konstruktivnog rešenja. Sila otpora je određena primenom Bernulijeve jednačine i jednačine kontinuiteta na strujanje tečnosti kroz protočne otvore u hidrauličnoj kočnici. Pri tome se pretpostavlja da je strujanje u kočnici jednodimenzionalno i stacionarno.

Iz podataka o HK oruđa uočljivo je da postojeći rezultati u vezi sa istraživanjem koeficijenata otpora proticanju tečnosti k (k_1, k_2) još uvek ne obezbeđuju dovoljno pouzdane i tačne pripadajuće vrednosti za celi proces trzanja cevi oruđa. Naime, vrednosti koeficijenata otpora k date su u vrlo širokim granicama [2, 3] (tabela), ili su određene preko rezultata eksperimenta za dijafragme koje često nemaju mnogo sličnosti sa otvorima za proticanje tečnosti u HK oruđa.

Ukoliko se oblici protočnih otvora HK više razlikuju od uobičajenih – tipičnih dijafragmi, utoliko je nesigurnija vrednost koeficijenata otpora proticanju. Stoga koeficijent k predstavlja najslabiju stranu klasične metode za određivanje hidrauličnog pritiska u kočnici. Autori klasične metode proračuna HK oruđa,

Autori	Vrednosti koeficijenta otpora proticanju	
	osnovno proticanje	dopunsko proticanje
$k_1 = \frac{1 + \xi}{\mu^2}$ (Toločkov)	$k_1 = 1,2 \text{ do } 1,6$	$k_2 = (3 \text{ do } 4) k_1$
$k_1 = \frac{1}{C^2 \mu_r^2} + \left(\frac{a}{A + a}\right)^2$ (Orlov)	$1,1 < k_1 < 4$	$k_2 = 3 \text{ do } 5$

Oznake veličina u tabeli su:

ξ - koeficijent unutrašnjeg trenja tečnosti,

μ - koeficijent kontrakcije tečnosti za otvore sa oštrim ivicama,

$C \approx 0,9-0,95$ - koeficijent gubitaka usled trenja tečnosti,

$\mu_r \approx 0,5 \varphi_r^2$ - koeficijent kontrakcije tečnosti za otvore sa zaobljenim ivicama,

$\varphi_r = 1 + 1,77 \frac{r}{\sqrt{a}}$ - geometrijska karakteristika otvora (r - radijus zaobljenja),

a, A - površina preseka kanala i cilindra kočnice.

Prema [3] obično se uzima da je: $0,5 < C\mu_r \leq C$ i $0 < r \leq 0,235 \sqrt{a}$.

koeficijent otpora proticanju tretiraju kao jedan popravni koeficijent kojim se obuhvata korekcija pada pritiska tečnosti zbog viskoznosti, vrtloga, oblika i geometrije protočnog otvora, brzine proticanja i sl. Radi toga u postupku proračuna pritiska i sile hidrauličnog otpora kočnice usvajaju konstantnu vrednost koeficijenta otpora k , koja važi za celi proces trzanja, odnosno put kretanja klipa. Za stvarnu, odnosno tačnu vrednost koeficijenta k uzima se ona vrednost koja daje najmanju razliku ($\leq 1\%$) između proračunatih veličina pritiska tečnosti u kočnici.

Značaj tačnog određivanja veličine koeficijenta k za ispravno projektovanje protočnih površina HK nesumnjiv je i praktično ga je nemoguće potpuno tačno definisati bez pouzdanih eksperimentalnih rezultata za celi proces trzanja na konkretnim rešenjima HK oruđa.

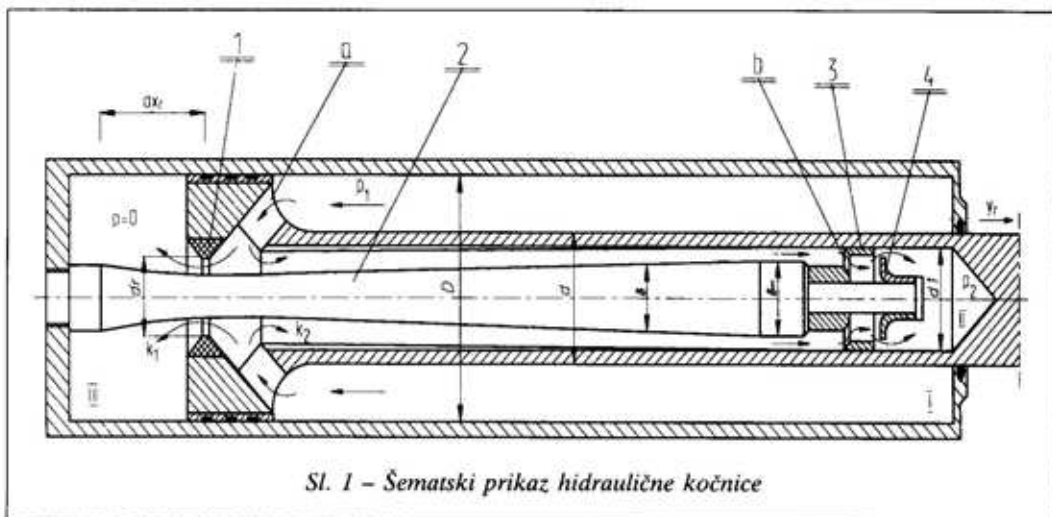
Na osnovu iznetog, u radu je na konkretnom primeru modela HK određena zakonitost promene $k = f(x, t)$, x -

put trzanja (pomak klipa) na ukupnom putu trzanja.

Ideja je da se u dijapazonu datih vrednosti za koeficijent otpora k prema podacima u literaturi (tabela), simulacijom matematičkog modela za dinamičku identifikaciju parametara HK [5], definiše zakon promene $k = f(x, t)$ koji obezbeđuje isti ili približno isti nivo promene sile F_k kočnice utvrđene eksperimentalnim putem. Korektnost postupka biće potvrđena stepenom odstupanja proračunatih vrednosti za pritisak tečnosti, odnosno, silu kočnice na osnovu uporedne analize proračunskih i eksperimentalnih rezultata.

Određivanje koeficijenta otpora proticanju tečnosti

Verifikacija rezultata proračuna matematičkog i eksperimentalnog modela izvršena je na usvojenom modelu HK sa profilisanom kontraklipnjačom, prema



Sl. 1 - Šematski prikaz hidraulične kočnice

slici 1. Pri tome su vrednosti koeficijenta otpora proticanju k posebno definisane za osnovno proticanje (k_1) tj. proticanje kroz otvore na klipnu i kontraklipnu i dopunsko proticanje (k_2), tj. proticanje tečnosti kroz zazor između klipnjače i kontraklipnjače.

Usvojeni model kočnice tipičan je za artiljerijske sisteme srednjih i velikih kalibara sa respektivnim balističkim karakteristikama i velikim impulsima sile trzanja.

Kretanjem klipa brzinom $v_r(t)$ najveći deo tečnosti istiskuje se iz radnog prostora cilindra I kroz otvore na klipnu i prstenasti otvor isticanja a_x u prostor III cilindra kočnice (tzv. osnovno proticanje). Trenutna površina prstenastog otvora na putu trzanja x_r obrazuje se određenim položajem kontraklipa (1) u odnosu na kontraklipnjaču (2) i iznosi:

$$a_x = \frac{\pi}{4} (d_r^2 - \delta_x^2)$$

Istovremeno, drugi relativno manji deo tečnosti protiče u unutrašnji prostor II šupljine klipnjače (tzv. dopunsko protica-

nje) i dalje prolazi kroz zazor između klipnjače i kontraklipnjače preko otvora (b) klipa kočnice vraćanja (moderator 3) i pored ventila (4) u oslobođeni prostor šupljine klipnjače.

Površina poprečnog preseka šupljine klipnjače iznosi:

$$a_1 = \frac{\pi}{4} d_1^2, \text{ a}$$

na najužem delu definisana je izrazom:

$$a_n = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - \delta_{max}^2)$$

Proticanje tečnosti između klipa i zidova cilindra kočnice u toku trzanja se zanemaruje. Obično je površina otvora u klipnu dovoljno velika, pa se uzima da su parametri protoka tečnosti u radnoj zapremini cilindra i unutrašnjoj šupljini klipa jednaki.

Za numeričko rešenje matematičkog modela ponašanja HK za vreme trzanja prema klasičnom i poboljšanom metodu proračuna [5] urađeno je odgovarajuće programsko rešenje korišćenjem paketa

MATLAB 4.2C i simulacioni model na osnovu modula SIMULINK. Ovakvim rešenjem omogućeno je da se dobiju vremenske funkcije nepoznatih nelinearnih koeficijenata diferencijalne jednačine kretanja mehaničkog sistema HK trzanja, i vremenske funkcije svih proračunskih veličina kočnice.

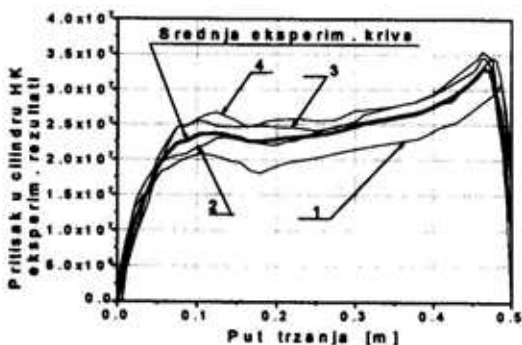
Pošto se radi o modelu HK sa promenljivim protočnim površinama za vreme trzanja, programsko rešenje omogućuje da se izračunaju vremenske funkcije Re-brojeva, kao i koeficijenti lokalnih otpora strujanja hidraulične tečnosti za svaki trenutni položaj klipa na putu trzanja. Na osnovu toga, pritisak tečnosti u svakoj tački trzanja u odnosu na klasičan model određen je kao suma laminarnog, turbulentnog i Bernuli-Bordinog člana.

Koliko će članova kojima se definiše laminarni ili turbulentni režim strujanja tečnosti u kočnici biti konstitutivno za opštu jednačinu pritiska zavisi od konstrukcijskih oblika i dimenzija kanala kroz koje tečnost za vreme trzanja treba da prođe. U teorijskom smislu na ovaj način je relacija Bernuli-Bordina [1] proširena članom koji sadrži gubitke usled unutrašnjeg trenja tečnosti.

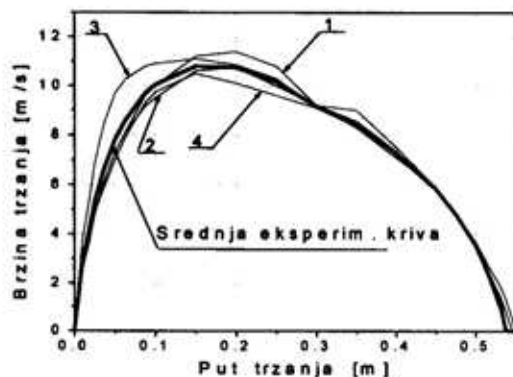
Eksperimentalne vrednosti koeficijenta otpora proticanju utvrđene su na osnovu eksperimentalno dobijenih kriva za pritiske $p_1(x)$ i $p_2(x)$ i brzinu trzanja $v_r(x)$ prema izvedenim opitima na eksperimentalnom oruđu [4] u realnim uslovima upotrebe artiljerijskog oruđa (slike 2, 3 i 4).

Da bi se izvršilo njihovo upoređenje sa proračunskim rezultatima numeričkog modela, izvršena je interpolacija i dobijene su srednje eksperimentalne krive prikazane na istim slikama.

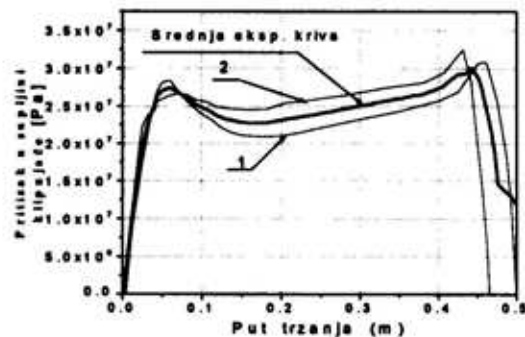
Za poznate geometrijske veličine i karakteristike tečnosti eksperimentalnog oruđa, koeficijent otpora proticanju tečnosti kroz kontraklip $k_1(x)$ određen je relacijom [4]:



Sl. 2 – Promena pritiska p_1 u HK



Sl. 3 – Promena brzine trzanja v_r



Sl. 4 – Promena pritiska p_2 u šupljini klipnjače

nosti kroz kontraklip $k_1(x)$ određen je relacijom [4]:

$$k_1 = \frac{2}{\rho} \frac{a_x^2 (A - a_1)}{A_x (A_x - \delta a_x)^2} \frac{p_1(x)}{v_r^2(x)} \quad (3)$$

gde je:

$A = A_k - A_u$ – površina na koju deluje pritisak tečnosti,

$A_u = \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2)$ – površina prstenastog

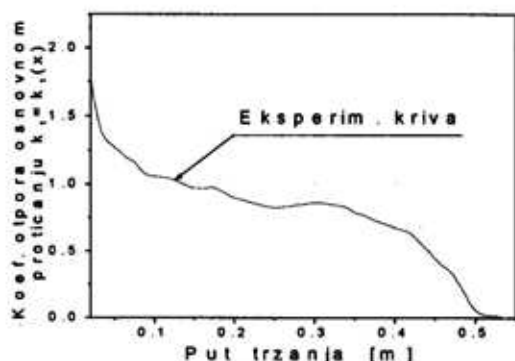
zazora između unutrašnjeg dela klipnjače i regulacionog prstena,

$A_x = A_k - A_{kk}$ – trenutna površina preseka,

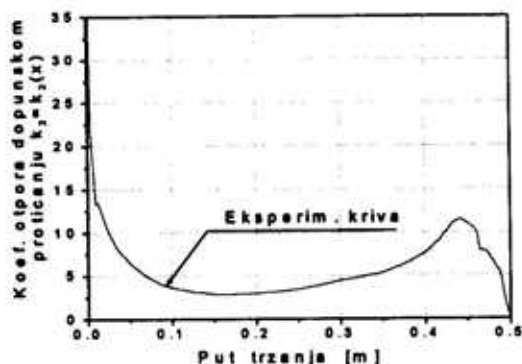
$\delta = 0,85$ – koeficijent suženja protoka [1].

Na sličan način, za koeficijent otpora proticanju k_2 kroz moderator, tj. koeficijent otpora dopunskom proticanju, važi relacija:

$$k_2 = \frac{2 a_0^2 p_1(x) - p_2(x)}{\rho a_1^2 v_1^2(x)} \quad (4)$$



Sl. 5 – Koeficijent otpora proticanju $k_1(x)$



Sl. 6 – Koeficijent otpora proticanju kroz moderator $k_2(x)$

Njihova promena sa putem trzanja prikazana je na slikama 5 i 6.

Posmatrajući dobijene krive koeficijenata k_1 i k_2 vidi se da su oni promenljivi na putu trzanja. Vrednosti i karakter promene koeficijenata su izraziti na početku i na kraju trzanja, dok je u srednjem delu promena manja, što je verovatno uticalo da se za proračune klasičnim metodama koristi njihova srednja vrednost.

Uočava se, takođe, da su vrednosti koeficijenta otpora $k_1(x)$ za proticanje kroz kontraklip znatno manje od koeficijenta otpora $k_2(x)$ kroz zazor klipnjače i kontraklipnjače. U literaturi se navodi da je odnos $k_2/k_1 = 4-5$. Ovde su prikazane krive za koeficijente otpora dobijene na normalnoj temperaturi.

Na osnovu izloženog može se zaključiti sledeće:

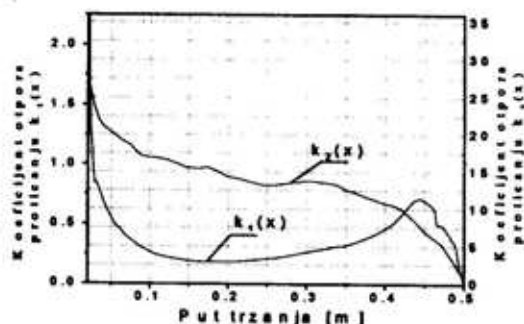
- prema dobijenim rezultatima za posmatrani tip kočnice i mineralno ulje OHA (sa kojim je vršeno eksperimentisanje) prema [4], promena temperature ne utiče na promenu pritiska i brzinu trzanja, kao ni na koeficijent otpora proticanju tečnosti;

- koeficijent otpora k zavisi od odnosa radne površine klipa i protočnih otvora i veći je ukoliko je taj odnos veći. Za eksperimentalno oruđe, čiji je odnos površina 11,8, srednja vrednost $k_{1sr} \approx 1,0$;

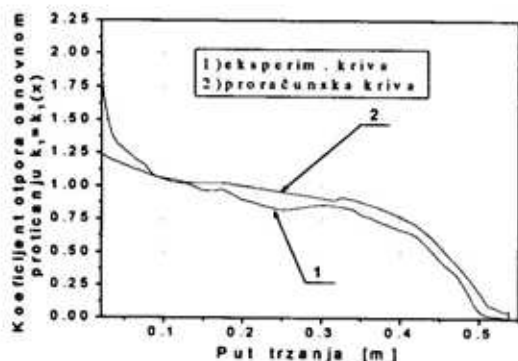
- koeficijent otpora k je promenljiv sa promenom dužine trzanja i nije konstantan na celoj dužini trzanja kako se ranije pretpostavljalo;

- dobijeni promenljivi koeficijenti otpora k omogućuju korektnije i tačnije određivanje protočnih otvora, što će u procesu projektovanja kočnica naknadne i često neminovne korekcije protočnih otvora svesti na najmanju meru.

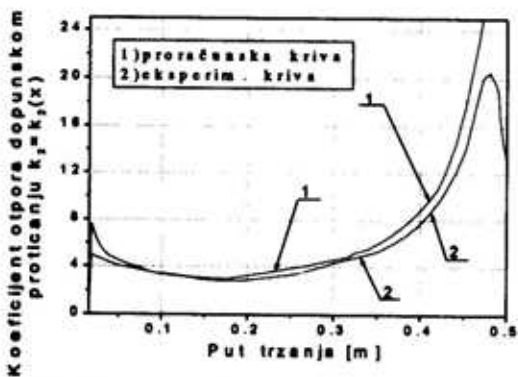
Uporednom analizom eksperimentalnih rezultata koeficijenata otpora pro-



Sl. 7 – Odnos koeficijenta otpora proticanju



Sl. 8 – Promena koeficijenta otpora osnovnom proticanju $k_1(x)$



Sl. 9 – Promena koeficijenta otpora dopunskom proticanju $k_2(x)$

tanju, prema slici 7, uočava se da su vrednosti koeficijenta $k_1(x)$ znatno manje od koeficijenta otpora $k_2(x)$. Njihov odnos tokom trzanja je promenljiv i kreće se u okviru ekstremnih vrednosti

$k_2(x)/k_1(x) = 2,5-20,8$. Prosečna srednja vrednost koeficijenta otpora proticanju tečnosti na celoj dužini trzanja iznosi za $k_{1sr}(x) \cong 0,92$, a za $k_{2sr}(x) \cong 6,51$, pa je i njihov odnos $k_{2sr}(x)/k_{1sr}(x) \cong 7,07$.

Dobijena vrednost odnosa koeficijenta otpora proticanju nešto je veća od podataka u literaturi koje navode razni autori (prema Toločkovu $k_2/k_1 = 3-4$ ili Orlovu $k_2/k_1 = 4-5$). Odstupanje rezultata je, verovatno, posledica razlike uslova i metodologije izvođenja eksperimentalnih merenja za usvojeni model hidraulične kočnice.

Funkcijske promene koeficijenta $k_1(x)$ i $k_2(x)$, određene numeričkim postupkom prema predloženom matematičkom modelu [5], pokazale su dobru podudarnost sa eksperimentalno dobijenim krivama (slike 8 i 9), čime je potvrđena korektnost predloženog poboljšanog modela u odnosu na klasičan model proračuna HK.

Uticaj koeficijenta otpora proticanju na izlazne veličine HK

S obzirom na utvrđenu međuzavisnost koeficijenata otpora proticanju tečnosti i pojedinih parametara HK [5], ispitan je uticaj njihove promene na pritisak tečnosti u kočnici i put trzanja kao najvažnije izlazne veličine HK. Navedeni uticaj ilustrovan je na slikama 10 i 11.

Koeficijent otpora $k_1(x)$ manjan je u granicama od 1,2 do 1,6 (tabela) prema literaturi za ovaj tip HK, pri čemu je posmatran kao promenljiva funkcija puta trzanja (krive 1 do 6). Ostali uticajni parametri (koeficijent otpora k_2 i površina protočnih otvora a_x) razmatrani su kao nepromenljive tj. konstantne veličine. Sa slike 10 se vidi da sa povećanjem k_1 dolazi do porasta pritiska u cilindru koč-

nice. Taj porast je naročito izražen pri kraju puta trzanja pri rastućoj funkciji koeficijenta k_1 .

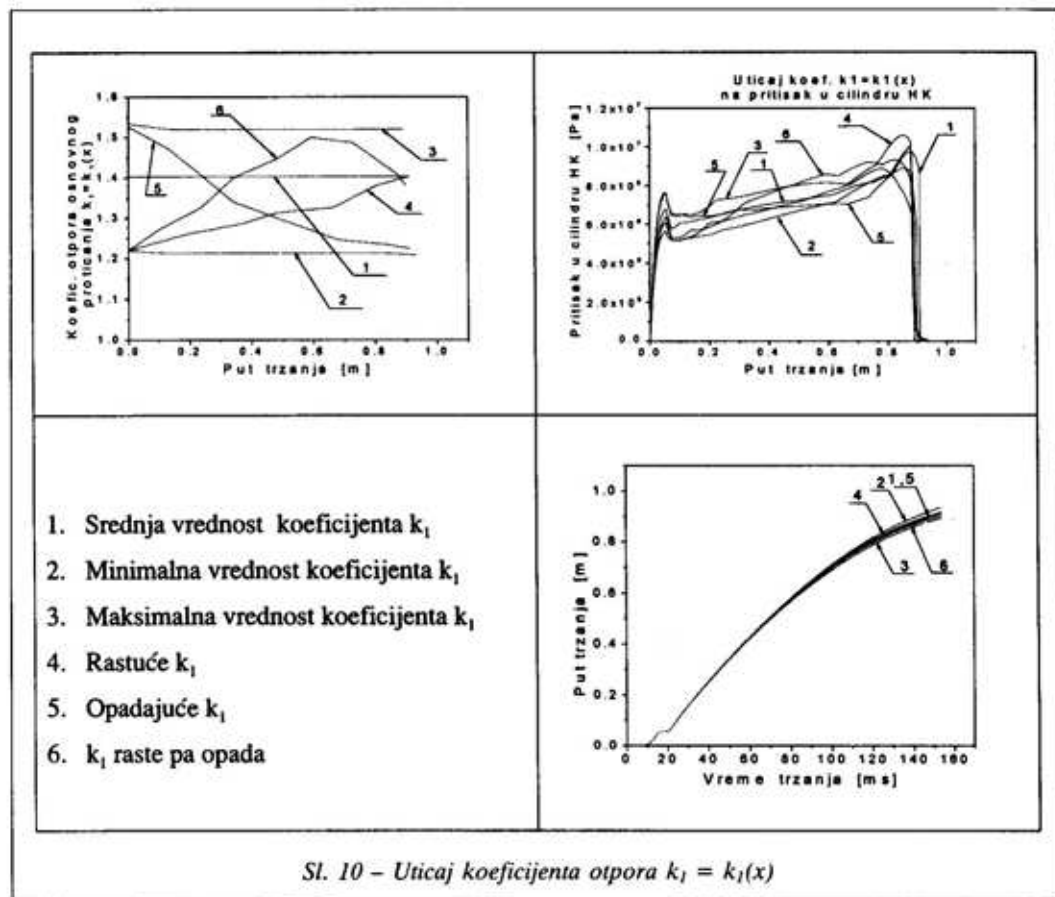
Koeficijent k_1 i u početnom delu povećava pritisak u cilindru kočnice, ukoliko je blizak gornjoj granici variranja, tj. vrednosti 1,6. Uticaj promenljivosti koeficijenta k_1 , prema proračunskim rezultatima na veličinu puta trzanja, znatno je manji nego na pritisak tečnosti. Praktično, promena koeficijenta k_1 ne utiče na veličinu puta trzanja.

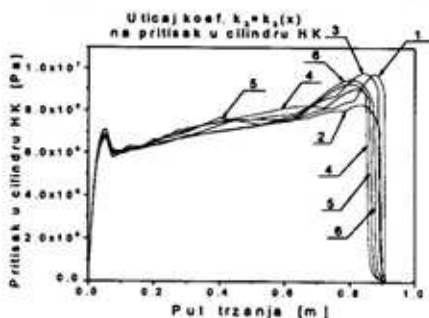
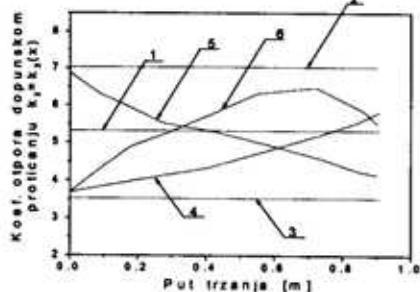
Vidi se, takođe, da veličina koeficijenta $k_1(x)$ opada sa putom trzanja (slika 5) i pored smanjenja protočnih površina pri kraju trzanja. Opadanje vrednosti $k_1(x)$ sa putem trzanja posledica je značaj-

nijeg pada brzine trzanja, što uzrokuje znatan pad lokalnih brzina strujanja tečnosti, pri čemu se strujanje tečnosti u kočnici približava laminarnom režimu strujanja, a otpor strujanju opada.

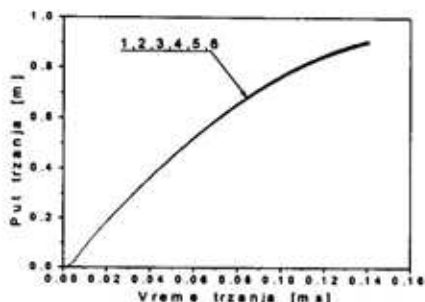
Uticaj promene koeficijenta dopunskog proticanja $k_2 = k_2(x)$ uz nepromenjene, tj. konstantne veličine k_1 i a_x prikazan je na slici 11.

Koeficijent otpora proticanju $k_2(x)$ utiče na pritisak u cilindru kočnice više pri kraju puta trzanja, dok je njegov uticaj na pritisak u početnom delu puta trzanja neznatan. Uticaj $k_2(x)$ na put trzanja je, takođe, zanemariv. Veće vrednosti k_2 prouzrokuju smanjenje maksimalnog pritiska tečnosti pri kraju trzanja.





1. Srednja vrednost koeficijenta k_2
2. Maksimalna vrednost koeficijenta k_2
3. Minimalna vrednost koeficijenta k_2
4. Rastuće k_2
5. Opadajuće k_2
6. k_2 raste pa opada



Sl. 11 – Uticaj koeficijenta otpora $k_2 = k_2(x)$

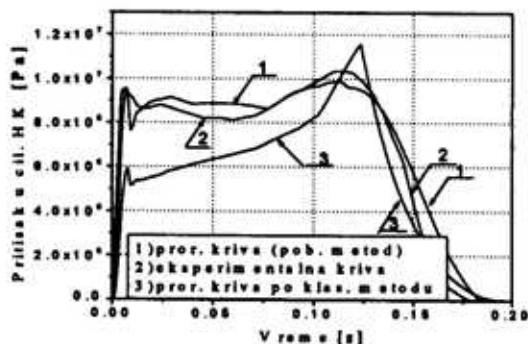
Uzrok smanjenju pritiska u cilindru kočnice je naglo smanjenje brzine strujanja tečnosti iz šupljine klipnjače u prostor moderatora.

Može se zaključiti da na izlazne parametre kočnice po klasičnom modelu, a naročito na pritisak tečnosti u cilindru kočnice, više utiču promene koeficijenta k_1 od k_2 . Prema tome, njihovo proizvoljno biranje u određenim granicama (u literaturi se navodi više podataka), u dosadašnjim proračunima klasičnog modela HK ne daje dovoljno tačne rezultate.

Za uporednu analizu proračunskih veličina izlaznih rezultata po klasičnom i predloženom poboljšanom modelu sa podacima realizovanog eksperimenta prikazane su dobijene krive za: pritisak tečnosti u cilindru kočnice na slici 12, brzinu

trzanja na slici 13, za put trzanja na slici 14 i silu otpora kočnice trzanja na slici 15.

Prema slici 12, promenu pritiska tečnosti u cilindru kočnice karakterišu dva skoka (pika) na početku trzanja i pri kraju trzanja, u trenutku zatvaranja pro-

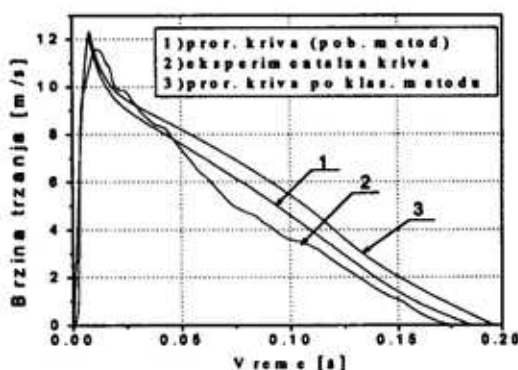


Sl. 12 – Promena pritiska $p_1(t)$ tečnosti za vreme trzanja

točnih otvora moderatora i srednji (sedlasti) deo krive na većem delu puta trzanja. Karakter promene pritiska logično prati zakonitost promene protočnih površina i brzine strujanja tečnosti. Oblik promena krive pritiska po modelu za predloženi poboljšani model i eksperimentu (srednja eksperimentalna kriva) ukazuje na njihovu vrlo dobru usaglašenost i mala odstupanja u vrednostima, a znatnu razliku u odnosu na proračunsku krivu po klasičnom postupku. Na tu razliku najviše utiču koeficijenti otpora proticanju koji su, prema navedenim istraživanjima, izrazito promenljivi na početku i pri kraju trzanja.

Prosečno srednje odstupanje između kriva pritiska dobijenih poboljšanim modelom i eksperimentom (krive 1 i 2) neznatno je na gotovo celoj dužini trzanja, a veliko u poređenju sa krivom 3 po klasičnom modelu. Na mestu prvog maksimuma najveće odstupanje između kriva iznosi 37%, na srednjem delu ($t=0,08$ s) ono je 16%, a na mestu drugog maksimuma približno je 17%. Prosečna odstupanja dobijenih rezultata u uporednoj analizi za sve slučajeve utvrđena su u odnosu na srednju eksperimentalnu krivu.

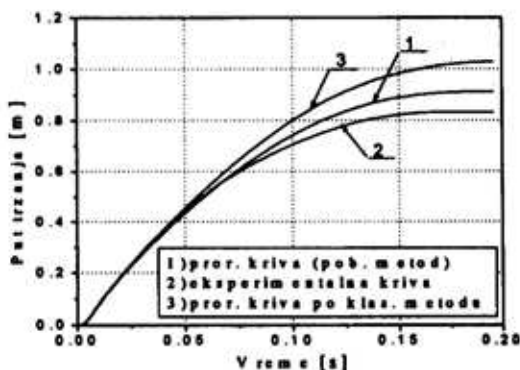
Uporedni rezultati za brzine trzanja $v_r(t)$, prema slici 13, pokazuju da su oblik i karakter promena brzine po modelu i eksperimentu slični. U odnosu na eksperimentalnu krivu najveće odstupanje ima proračunska kriva po klasičnom modelu. Do trenutka nastanka maksimuma red veličina brzina u potpunosti je identičan, na srednjem delu su najveća prosečna odstupanja (do 30%), a pri kraju trzanja manja (oko 18%). Rezultati pokazuju da je brzina trzanja prema poboljšanom modelu bolje usaglašena sa eksperimentom od klasičnog modela.



Sl. 13 – Promena brzine trzanja $v_r(t)$ za vreme trzanja

Eksperimentalna kriva puta trzanja (2), na slici 14, dobijena je integracijom eksperimentalno određene brzine trzanja, jer put nije meren. Oblici kriva su slični, sa najvećim odstupanjem na kraju trzanja (oko 21%). Dobijene dužine trzanja po eksperimentu i poboljšanom modelu su u dopuštenim granicama prema podacima za ispitivano oruđe (940 mm).

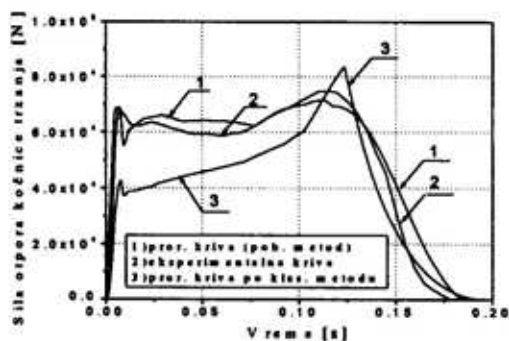
Pošto je sila otpora kočnice trzanja $F_k(t)$ direktno proporcionalna pritisku tečnosti i konstante (efektivna površina klipa), jasno je da će oblik i karakter promena sile biti vrlo sličan pritisku. Najveća vrednost sile dobijena je po klasičnom modelu, a za sve krive ostvaruje se pri kraju trzanja, što je u saglasnosti



Sl. 14 – Promena puta trzanja $x_r(t)$ za vreme trzanja

sa literaturom za ovaj tip kočnice. Promena sile otpora klasičnog modela je izrazito dinamična u odnosu na dosta ujednačenu promenu sile otpora poboljšanog i eksperimentalnog modela tokom vremena trzanja.

Prema dobijenim rezultatima sledi da je ostvareni impuls sile otpora trzanju po eksperimentalnom i poboljšanom modelu veći u odnosu na klasični model u toku trzanja. Razliku impulsa sile na slici 15 ilustruje šrafirana površina ispod krivih. To ukazuje na ravnomernije kočenje kretanja trzajuće mase u toku trzanja, a



Sl. 15 – Promena sile otpora $F_k(t)$ za vreme trzanja

time i ravnomernije opterećenje elemenata lafeta oruđa u odnosu na klasičan model.

Zaključak

U klasičnom modelu proračuna parametara HK, koeficijenti otpora osnovnom proticanju tečnosti k_1 i dopunskom proticanju tečnosti k_2 konstantni su na putu trzanja (vrednost usvojena iz literature [2]). Međutim, dobijeni rezultati eksperimentalnog i predloženog poboljšanog modela (slike 8 i 9) pokazali su da su koeficijenti otpora proticanju k_1 i k_2 promenjivi na putu trzanja.

Karakter i oblik promene koeficijentata $k_1(x)$ i $k_2(x)$, osim na samom početku trzanja i pri kraju procesa trzanja, ukazuju na dobru saglasnost podataka eksperimenta i proračunskih rezultata na celjoj dužini trzanja.

Nagli rast $k_1 = f\left(C_1; \frac{p_1}{v_r^2}\right)$ na početku

trzanja uslovljen je znatno većim gradientom porasta pritiska tečnosti u odnosu na brzinu pomaka klipa. Tokom trzanja, promenljiva konstanta C_1 i relativni odnos pritiska i brzine postaju manji, što uslovljava pad funkcije $k_1(x)$ do kraja trzanja. Za tačno određivanje veličine promene $k_1(x)$ potrebno je da se znaju dimenzije protočnih površina kočnice trzanja i eksperimentalno određene vrednosti pritiska tečnosti i brzine trzanja. S obzirom na dobijenu dobru saglasnost eksperimentalnih i proračunskih rezultata, mogu se odrediti odgovarajući aproksimacioni polinomi, sa ciljem da se dođe do matematičke formalizacije zakonitosti promene koeficijenta otpora $k_1(x)$, čime se obezbeđuje tačnije izvođenje parametara HK oruđa. Činjenica da su u srednjem delu krive dobijene vrednosti koeficijentata $k_1(x)$ dosta ujednačene i kreću se oko srednje vrednosti $k_{1sr} = 1,02$, bila je verovatni razlog da se u klasičnim modelima proračuna ova vrednost uzimala za konstantu na celjoj dužini trzanja. Kolika je greška usled toga učinjena može se jednostavno pokazati.

Dobijeni rezultati proračunskog i eksperimentalnog modela, prema slici 9, pokazuju izrazito nestacionaran tok promene $k_2(x)$ na početku i na kraju trzanja.

Na srednjem delu krive, promena veličine $k_2(x)$ je postepena i eksponencijalno raste pri kraju trzanja. Objašnjenje ovakvog stanja promene koeficijenta

$k_2(x)$ posledica je trenutnog odnosa pada pritiska tečnosti u kočnici i brzine trzanja,

$$k_2 = f\left(C_2; \frac{P_1 - P_2}{v_r^2}\right).$$

Za definisani oblik promene proračunskih i eksperimentalnih veličina koeficijenta dopunskog proticanja $k_2(x)$ u cilindru kočnice takođe se mogu odrediti odgovarajući aproksimacioni polinomi, što doprinosi tačnijem proračunu u odnosu na klasičan pristup.

Literatura:

- [1] Stanisavljević, B.: Projektovanje artiljerijskih sistema, knjiga 2 – Teorija hidroelastičnih sistema, VTI, Beograd, 1960.
- [2] Toločkov, A.: Teorija lafetov artiljerijskih ustanovok, Oborniz, Moskva, 1960.
- [3] Orlov, B.: Projektirovanie raketnih i stvolnih sistem, Moskva, 1974.
- [4] Jovanović, R.: Eksperimentalno određivanje koeficijenta proticanja u hidrauličnim kočnicama oruda, NTP br. 10, VTI, Beograd, 1971.
- [5] Ristić, Z.: Prilog numeričkoj analizi hidrauličnog sistema za kočenje kretanja cevi, doktorska disertacija, VTA VJ, Beograd, 1999.