

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 5 (1977/1978)

Številka 1

Strani 49-57

Tomaž Pisanski:

BALISTIKA

Ključne besede: fizika, mehanika, termodinamika, notranja balistika, topništvo, balistično nihalo, kronograf.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/5/5-1-Pisanski.pdf>

© 1977 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2009 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.



BALISTIKA

I. DEL

ZGODOVINA TOPNIŠTVA

Balistika je znanost, ki preučuje gibanje izstrelka (projektila). ("balein" pomeni v grščini vreči, metati.)

Pot izstrelka se deli na:

- pot po cevi
- pot zunanj cevi.

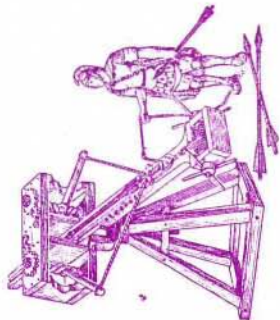
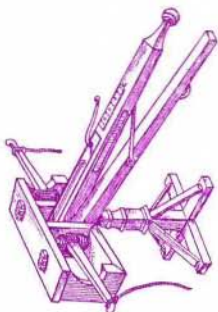
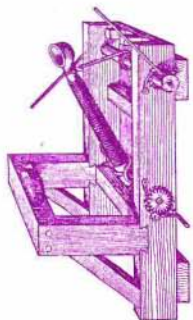
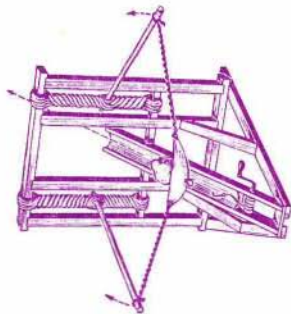
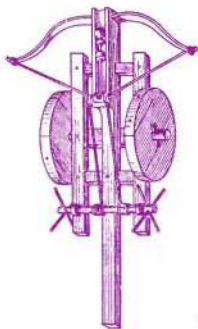
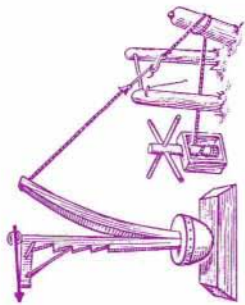
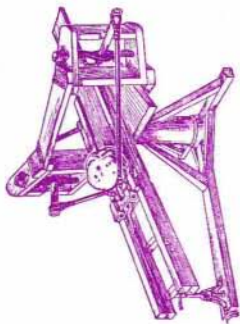
Iz tega izvira tudi stara delitev balistike na *notranjo* in *zunanjo*. Razvoj tehnike je povzročil, da se je balistika močno razrasla in danes imamo številne nove veje te znanosti: raketna balistika, balistika letalskih bomb, vesoljska balistika ...

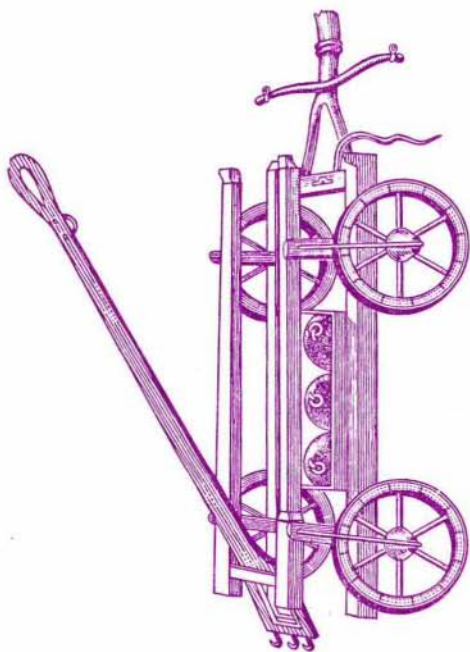
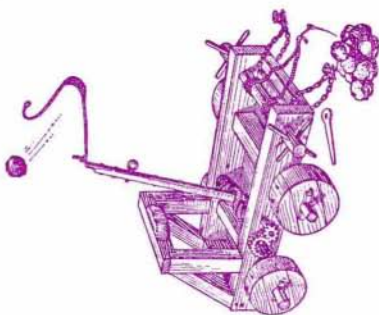
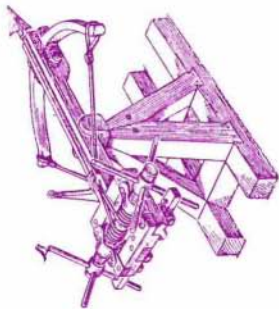
Balistika je bila zvesta spremljevalka topništva in je v veliki meri vplivala na njegov razvoj.

Vse civilizacije - tudi najstarejše - so čislale umetnost bojevanja na daljavo. Z metanjem kamenja, kovinskih krogel, kopij, puščic itd. so si ljudje od nekdaj prizadevali premagati nasprotnike.

Znanje o gibanju izstrelkov je bilo dolgo časa zelo skromno. Se v srednjem veku so mislili, da vodoravno izstreljene krogle letijo vodoravno in da se poševno izstreljene krogle vzpenjajo v ravni črti in se nato v ravni črti tudi spuščajo. Šele leta 1537 je znani matematik in balistik Tartaglia dokazal, da je tir izstrelka kriva črta.

Topništvo v pravem pomenu besede se je začelo razvijati z izumom smodnika v štirinajstem stoletju. Sprva so bila orožja okorna in ne preveč učinkovita. Polnili so jih (podobno kot danes) zadaj. Izstrelki so bili iz svinca ali kamna. Ze v petnajstem stoletju so orožja, imenovana "bombarde", močno izpopolnili. Cevi so po-





Sl. 1. Starodavna orožja za bojevanje
na daljavo

stavili na gibljiva podnožja (lafete). To je močno povečalo premičnost topov in olajšalo namerjanje. Iz takih topov so izstreljevali krogle, težke tudi do 100 kg. Ker pomični zadki cevi ne bi zdržali tako velikih obremenitev, so prešli na polnjenje spredaj. Cevi so z zadkom vred ulivali iz enega kosa. Kasneje so izboljšali izstrelke. Napolnili so jih z razstrelivom, kar je silno povečalo rušilno moč.

Ob koncu sedemnajstega stoletja je bilo topništvo (artilnerija) že tako pomembno, da se je ločilo od pehote in postalo samostojen rod vojske. V drugi polovici devetnajstega stoletja je napravilo spet velik skok. Prej gladke cevi so nadomestili z žlebljenimi ("risanimi"). Krogle so nadomestili s podolgovatimi granatami, ki so se zaradi ukrivljenih žlebov cevi vrtele okoli vzdolžne osi. S tem se je povečala stabilnost leta izstrelka. Z razvojem tehnike se je teža izstrelkov zmanjšala, začetna hitrost povečala in spet je prišlo do učinkovitejšega polnjenja cevi zadaj. Seveda pa se razvoj ni ustavil. Vsak dan načrtujejo in izdelujejo močnejša, natančnejša, vedno bolj avtomatizirana orožja s strahotno rušilno močjo. Že v petnajstem stoletju je nekdo zapisal: "Neumno se je vojskovati, zdaj ko obstajajo bombe!" In kaj mu lahko odgovorimo danes? (Sl. 2 na naslovni strani)

NOTRANJA BALISTIKA

Notranja balistika preučuje vedenje izstrelka v cevi. Dogajanje v cevi naj pripravi izstrelak za let zunaj cevi. Na ustju cevi mora izstrelak imeti pravo smer, potrebno *začetno hitrost** v_0 in se mora vrteti okoli vzdolžne osi. Za smer poskrbi strelec, za začetno hitrost in vrtenje pa orožje in naboj. Pomemben podatek je tlak v cevi, saj ga mora cev zdržati brez poškodbe. Hitrost izstrelka v cevi in tlak sta pomembna tudi za preračun trzaja (odrivnega sunka) cevi, ta pa spet odloča o načinu amortiziranja in s tem o stabilnosti orožja pri streljanju.

Za predstavo o velikostni stopnji nekaterih količin notranje balistike napravimo močno poenostavljen račun.

Denimo, da dobi izstrelak z maso $m = 10$ kg v topu z notranjim

* Začetna hitrost je hitrost izstrelka na ustju cevi.

premerom gladke cevi $d = 100 \text{ mm}$ ** in z dolžino cevi $D = 2 \text{ m}$ začetno hitrost $v_0 = 500 \text{ m/s}$.

Sila F plinov, ki delujejo na izstrelek kmalu po začetku izgorovanja smodnika, je dosti večja od trenja izstrelka ob cev, tako da lahko trenje zanemarimo. Da bo račun preprostejši, vzemimo silo za konstantno. Uporabimo Newtonov zakon: $F = ma$. Opravek imamo z enakomerno pospešenim gibanjem izstrelka. Iz enačb za pot in hitrost:

$$s = (1/2)at^2 \quad v = at$$

izpeljemo $v = \sqrt{2as}$ in $a = v^2/(2s)$. Hitrost v_0 na koncu cevi poznamo. Pospešek:

$$a = v_0^2/(2D) = 62500 \text{ m/s}^2$$

je več kot 6000-krat večji od težnega pospeška. Lahko si mislimo, kaj bi se zgodilo s potniki na Luno Julesa Verna, če bi jih zares izstrelili iz topa.

Čas, ki je potreben, da izstrelek doseže ustje cevi, je:

$$t_0 = v_0/a = 0,008 \text{ s}$$

Zares ne moremo trditi, da se izstrelek v cevi obotavlja. Sila, ki deluje na izstrelke, je

$$F = ma = 625000 \text{ N}$$

Za računanje tlaka p v cevi uporabimo enačbo $F = pS$, v kateri je S presek cevi: $S = \pi d^2/4$. Torej:

$$p = F/S = 4F/(\pi d^2) = 8 \cdot 10^7 \text{ N/m}^2 = 800 \text{ kp/cm}^2$$

Tlak v cevi je skoraj osemstokrat večji od navadnega zračnega tlaka. Cev mora biti zelo dobro izdelana, da prenese tolikšne obremenitve. Zdaj približno vemo, kolikšen je tlak v topovski cevi. Seveda pa je račun sam daleč od resničnosti, ki je dosti bolj zamotana.

V resnici poteka dogajanje v cevi nekako takole:

Ko sprožimo orožje, udari igla v vžigalno kapico in aktivira vžigalnik. Okoli vžigalnika se tlak poveča na približno 50 kp/cm^2 . Zaradi tega se smodnik vžge. Razvijajo se plini in tlak naglo narašča. Izstrelek je opasan z bakrenim obročem, ki je malo večji od vodil med žlebovi. Ko doseže tlak približno 200 kp/cm^2 , je si-

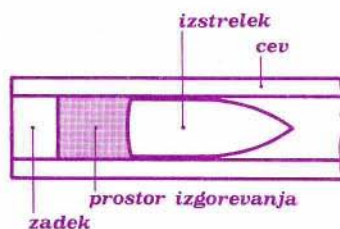
** Notranji premer cevi imenujemo v balistiki *kaliber*

la na izstrelek že tolikšna, da se vodila vrežejo v obroč in se začne izstrelek premikati. Do tega trenutka izgori manj kot 10% smodnika. Na začetku, ko je hitrost krogla majhna, se tlak še vedno povečuje, čeprav se povečuje tudi prostornina plinov. Ko izstrelek preleti 3 do 5 kalibrov (premerov cevi orožja), je prostornina že tako velika, da začneja tlak padati. Kmalu zatem je izgorevanje smodnika končano. Takrat ima krogla približno 60% hitrosti, ki jo doseže na ustju cevi, pritisk pa je že za 10% manjši od maksimalnega. Od tega trenutka se vroči plini širijo adiabatno. Potem ko izstrelek zapusti cev, plini zaradi velikega tlaka (približno 500 kp/cm²) še delujejo nanj, in mu malo povečajo hitrost. Tlak v cevi naglo pade in se izenači z zunanjim zračnim tlakom. Dogajanje v cevi ponazarjata sliki 4 in 5.

Končni rezultat izračunov notranje balistike, ki je hkrati osnova za račune zunanje balistike, je začetna hitrost projektila v_0 . Po začetni hitrosti lahko sklepamo, kako hitro se vrti izstrelek okoli vzdolžne osi na ustju cevi.

Slika 6 kaže cev, ki smo jo v mislih vzdolžno prerežali in jo razvili. Narisan je en sam žleb, čeprav jih je v pravi cevi več.

Ko se vodila v cevi vrežejo v obroč, se začne izstrelek vrteti, kot mu narekujejo žlebovi. Na navojni višini vodil in žlebov h se zavrti okrog svoje osi enkrat. Na



Sl.3 Izstrelek v cevi.

*** Bralec, ki pozna trigonometrijo, bo pritrnil temule sklepu:

$$\operatorname{tg} \beta_0 = \pi d / h$$

$$\omega_0 = 2\pi v_0 / h = (2v_0 / d) \operatorname{tg} \beta_0$$

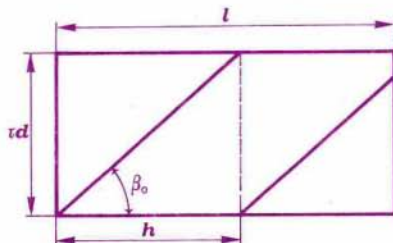
To pomeni, da je kotna hitrost odvisna od kalibra, strmine žleba $\operatorname{tg} \beta_0$ na ustju cevi in od začetne hitrosti izstrelka. Omenimo še, da obstajajo orožja s spremenljivo strmino žlebov. Navadno imajo topovi s kratkimi cevmi žlebove proti ustju cevi vse bolj položne. Običajno je $3^\circ \leq \beta_0 \leq 11^\circ$. Tobi pomenilo, da je

$$0.1 v_0 / d \leq \beta_0 \leq 0.4 v_0 / d$$

Pri našem topu s kalibrom $d = 100$ mm in z začetno hitrostjo $v_0 = 500$ m/s, bi za $\beta_0 = 7^\circ$ dobili $\omega_0 = 1228$ rd/s, oziroma $v_0 = 195$ s⁻¹. Izstrelek bi se v eni sekundi zavrtel približno dvestokrat okrog svoje osi.

ustju cevi ima hitrost v_0 . S to hitrostjo bi preletel pot h v času $t_0 = h/v_0$. Ker bi se v tem času ravno enkrat zavrtel okoli svoje osi, je $v_0 = 1/t_0 = v_0/h$ število vrtljajev na časovno enoto. Kotna hitrost na ustju cevi je

$$\omega_0 = 2\pi v_0 = 2\pi v_0/h \quad ***$$

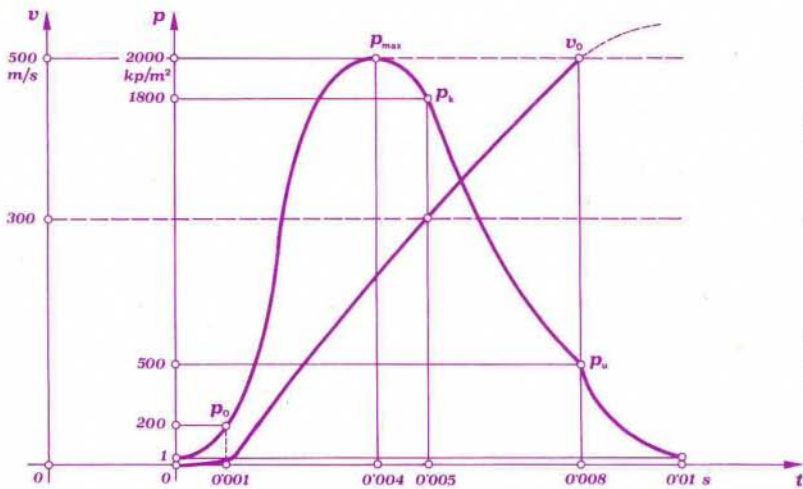


Sl.6 Razvita cev z žlebom.

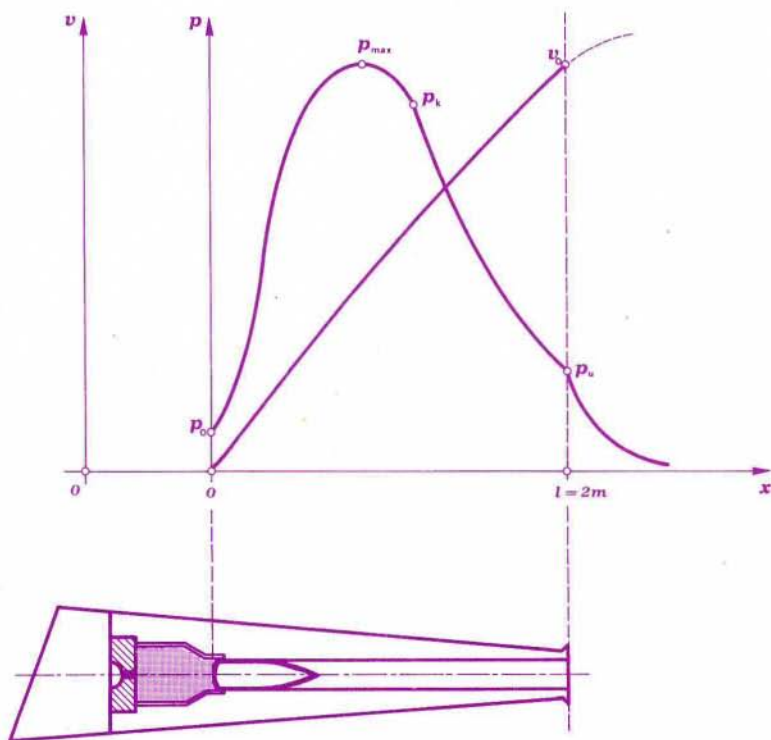
Seveda pa balistika ne more napovedati natančnih rezultatov. Konstrukcija cevi in naboja nista idealni. Cev se sčasoma začne kvariti. Kvaliteta smodnika se spreminja od izstrelka do izstrelka. Zato je potrebno račune preverjati v praksi. Najpomembnejše je vprašanje, ali se napoved dovolj dobro ujema z izmerjeno hitrostjo izstrelka na ustju cevi. Zato balistiki potrebujejo merilne naprave. 1742 si je angleški matematik Robins (1707-1751) zamislil *balistično nihalo*. To je velika škatla, napolnjena s prstjo. Na strani, od koder streljamo vanjo, je svinčena folija, ki preprečuje, da bi prst izpadla. Škatla visi na dolgi vrtljivi letvi. Ko izstrelek prileti v škatlo, prebije folijo in se zaustavi v prsti. Nihalo zaniha. Iz lastnosti nihala (mase škatle s prstjo, dolžine letve itd.), mase izstrelka in kota θ odklona nihala, je mogoče izračunati hitrost, s katero je izstrelek zadel mirujoče nihalo. Če streljamo iz bližine, se tako določena hitrost le malo razločuje od začetne hitrosti v_0 . Balistično nihalo je uporabno za merjenje hitrosti lahkih izstrelkov (npr. izstrelkov iz pištol, pušk in avtomatskega orožja). Pri topovskih granatah pa ga ne moremo uporabiti, saj bi morali imeti strahotno dolgo letev in ogromno škatlo.****

Druga metoda merjenja začetne hitrosti izstrelka, ki se uporablja še danes v različnih oblikah, je v načelu zelo preprosta. Na pot izstrelka postavimo drugega za drugim dva sensorja. Prvi sensor uro požene, drugi pa jo zaustavi. Tako določimo čas preleta t_d izstrelka za pot dolžine d od prvega do drugega sensorja. Če sta sensorja dovolj blizu drug drugemu in dovolj blizu cevi,

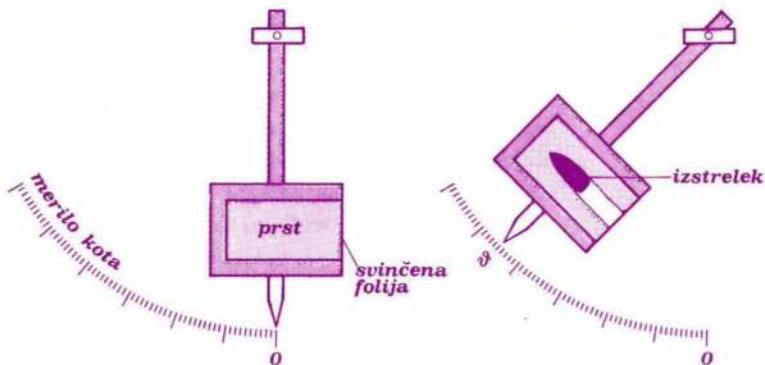
**** Če za merjenje hitrosti desetgramskih izstrelkov uporabljajo nihala z maso približno 1 tone.



Sl.4 Časovna odvisnost tlaka in hitrosti.

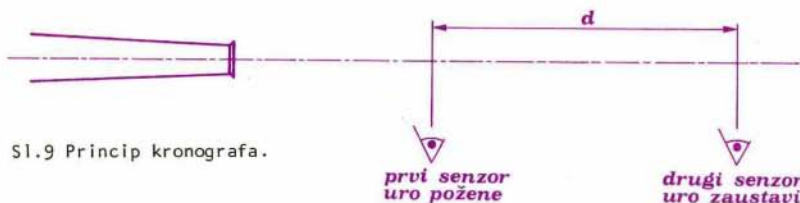


Sl.5 Odvisnost tlaka in hitrosti izstrelka v cevi od položaja.



Sl.7 Balistično nihalo.

Sl.8 Potem ko je izstrelak zadel balistično nihalo, se je odklonilo za kot θ .



Sl.9 Princip kronografa.

lahko vzamemo, da se giblje izstrelak enakomerno z začetno hitrostjo

$$v_0 = d/t_d$$

Take naprave imenujejo *kronografe*. Prvi mehansko električni kronograf je leta 1880 izdelal Boulanger. Do danes je kronograf doživel že več izboljšav, pri katerih ima glavno besedo elektronika.

V cevi se ob streljanju dogajajo trajne spremembe, ki jo počasni uničujejo. Tega procesa ne moremo zaustaviti, pa če še tako dobro skrbimo za cev. Sčasoma začetna hitrost izstrelka tako pade, da postane cev neuporabna. Dandanašnje cevi zdržijo po nekaj desetstisoč izstrelkov, preden se izrabijo. Balistiki govorijo o času skupne porabe cevi kot o *življenjskem času* cevi. Denimo, da zdrži cev 20 000 izstrelitev. Pospeševanje izstrelka pri eni izstrelitvi traja 0,01 s. Življenjski čas cevi = 20 000 · 0,01 s = 200 s = 3 min 20 s. Življenjski čas orožij je dosti krajši kot pri drugih toplotnih strojih.