



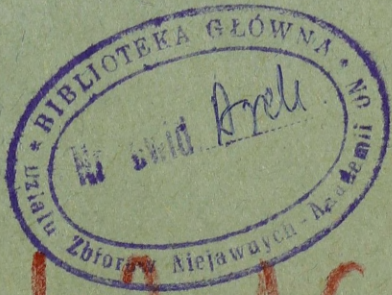
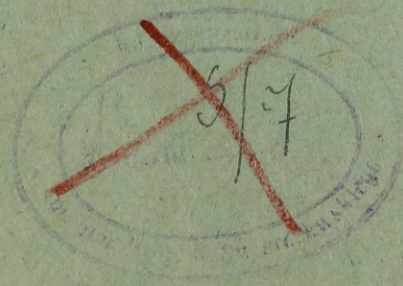
AKADEMIA SZTABU GENERALNEGO
im. gen. broni K. Świerczewskiego

KATEDRA Nr 7

15

mjr dypl. Włodzimierz BOJKO

Temat: BALISTYKA
(Skrypt)



4516

1961



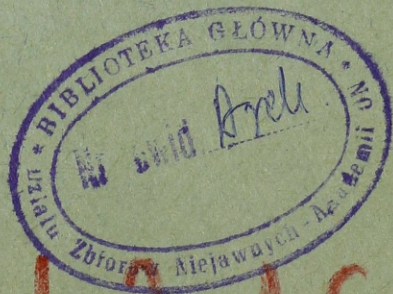
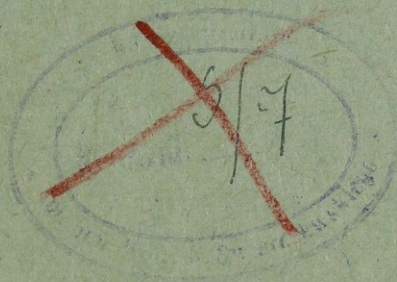
KATEDRA Nr 7

15

mjr dypl. Włodzimierz BOJKO

Temat: BALISTYKA

(Skrypt)



4516

A K A D E M I A S Z T A B U G E N E R A L N E G O
im.gen.broni K.Swierczewskiego

KATEDRA NAZIEMNYCH ŚRODKÓW OPL

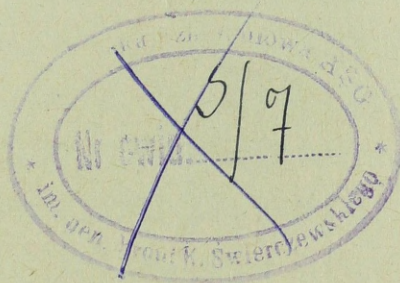
" ZATWIERDZAM "
SZEFA KATEDRY OPL

płk. dypl.prof. Józef DAC

15

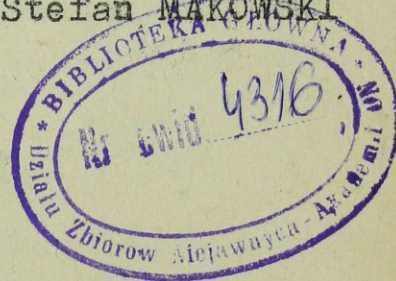
mjr dypl.Włodzimierz BOJKO

T e m a t: B a l i s t y k a
/ skrypt /



Zgadza się:
Z-CA SZEFA KATEDRY OPL

płk. dypl.Stefan MAKOWSKI



REMBERTÓW

STYCZEŃ

1961r.

w następnej fazie - efektu raketowego.

Rozpatrzmy proch, jako źródło energii, nadającej prędkość pociskowi. Proch jest związkiem pewnych składników chemicznych, które przy spalaniu się dają znaczną ilość ciepła i dużą ilość nagrzanego gazów, pod ciśnieniem których pocisk osiąga odpowiednią prędkość ruchu. Rozważmy zdolności wydzielania ciepła przez poszczególne związki, porównując dane zamieszczone w tabeli 1.

Tabela 1

Zdolność wydzielania ciepła przez poszczególne związki

Nazwa związku	Ilość ciepła, które wydziela 1 kg związku w kcal.
paliwo atomowe	2 10 ¹⁰
benzyna	10 000
spirytus	7 100
węgiel kamienny	7 000
	1 000
proch bezdymny	600-1200
proch czarny /dymny/	665

Z danych tabeli wynika, że największy zapas energii cieplnej posiada paliwo atomowe. Po nim bezpośrednio następuje benzyna, spirytus, węgiel kamienny i trotyl, natomiast prochy charakteryzują się mniejszym zapasem energii cieplnej. Nie-mniej jednak, one właśnie są tym zasadniczym źródłem energii wykorzystywanym do miotania pocisków, nie każdy bowiem związek posiadający duży zasób energii cieplnej może być wykorzystany dla potrzeb artylerii.

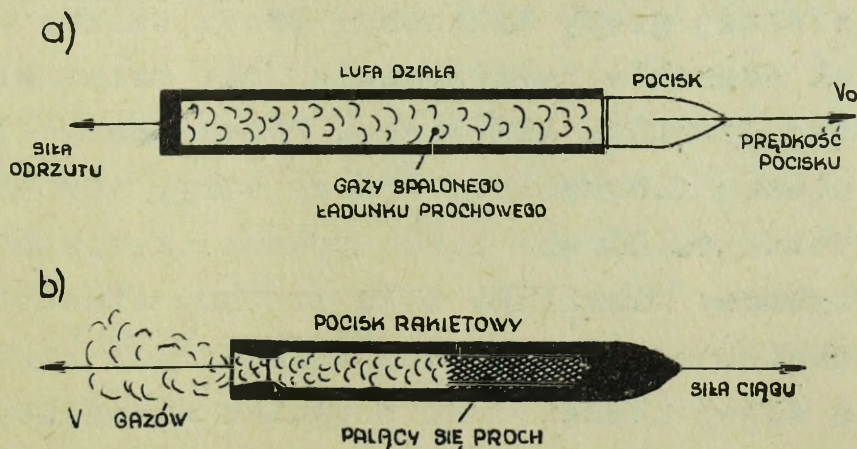
Aby materiał mógł być wykorzystany do miotania pocisków, oprócz posiadania dużego zasobu energii cieplnej, powinien on ponad-to odpowiadać następującym wymaganiom:

- spalanie musi odbywać się szybko, nie przechodząc jednak w detonację,

- spalaniu powinno towarzyszyć wydzielanie się dużej ilości gazów;
- spalanie powinno przebiegać w ściśle określony sposób, niezmienny dla każdego wystrzału;
- samo palenie powinno odbywać się bez dostępu powietrza.

Wykorzystanie paliwa atomowego jako materiału miotającego na razie jest niemożliwe ze względu na olbrzymią prędkość przebiegu procesu rozpadu. Wykorzystanie benzyny, spirytusu i innych materiałów łatwopalnych w artylerii lufowej jest niemożliwe ze względu na to, że przy paleniu się wyżej wymienionych materiałów konieczny jest dostęp powietrza /tłenu/, przy czym palenie odbywa się stosunkowo wolno i przy małej ilości wydzielanych substancji gazowych. Na przykład do spalenia 1 kg benzyny potrzeba 15,5 kg powietrza. Zatem benzynę jako źródło energii możemy wykorzystać w postaci mieszanki - benzyny i powietrza. Podana w tabeli 1 dla benzyny energia cieplna /10.000 kcal/ faktycznie dotyczy mieszanki 1 kg benzyny z 15,5 kg powietrza. Zatem 1 kg mieszanki wydziela jedynie około 610 kcal, tzn. mniej niż 1 kg prochu.

Jednak czynnikiem najważniejszym jest tu ilość wydzielanych przy spalaniu substancji gazowych. Przy jednakowej ilości prochu i mieszanki benzynowej w czasie spalania, proch daje 45 razy więcej substancji gazowych niż mieszanka.



Rys. 1

Rys. 1. Schemat wykorzystania ładunków prochowych

a - w artylerii,

b - w pociskach rakietowych.

Z powyższego wynika, że z wyszczególnionych materiałów najbardziej odpowiada naszym wymogom proch. Dlatego też proch znalazł najszersze zastosowanie jako materiał wybuchowy miotający. Proch wykorzystuje się nie tylko w artylerii lufowej ale również i w rakietowej. W lufowej artylerii proch spala się w zamkniętej, zmiennej objętości lufy i wykonuje pracę poprzez wydzielenie dużej ilości nagrzaných substancji gazowych, w artylerii rakietowej proch spala się w półzamkniętej komorze pocisków pod ciśnieniem, a wyrzucone z dużą prędkością gazy, stanowią źródło siły ciągu pocisku.

Rys. 1 przedstawia zasady wykorzystania prochu w artylerii lufowej i rakietowej. Obecnie w artylerii rakietowej, jak również w specjalnych rakietach, najczęściej stosuje się paliwo płynne, które spala się w pół zamkniętej komorze przy udziale utleniacza. Energia kinetyczna gazów, powstających przy spalaniu się mieszanki /paliwa i utleniacza/, wytwarza siłę ciągu, będącą wynikiem wylotu gazów z komory spalania.

Materiały wybuchowe miotające /prochy/ możemy podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- 1/ prochy - mieszaniny mechaniczne,
- 2/ prochy bezdymne /koloidalne/.

Do pierwszej grupy zaliczamy proch czarny /dymny/. Proch ten miał szerokie zastosowanie jako materiał wybuchowy miotający do końca XIX wieku. Proch czarny jest z reguły mechaniczną mieszaniną: 75% saletry, 10% siarki i 15% węgla drzewnego. Główne braki prochu czarnego to niskie walory balistyczne: niewielka siła prochu, niedostateczna trwałość mechaniczna, brak ściśle określonych reguł spalania i wytwarzanie dużej ilości dymu w wyniku niecałkowitego spalania się.

Przy spalaniu prochu czarnego wytwarza się /w stosunku wagowym/ tylko 43% gazów; pozostałe 57% - to niespalone cząsteczki, wyrzucane częściowo pod postacią dymu.

Wskutek wymienionych wyżej braków prochu czarnego, przy końcu XIX w. armie całego świata, jako materiałów wybuchowych miotających zaczęły używać tak zwanych prochów bezdymnych. W tym czasie znano już cały szereg silnych materiałów wybuchowych, lecz nie mogły być one stosowane jako materiały wybuchowe miotające ze względu na bardzo duże prędkości ich spalania się. Ażeby wykorzystać te materiały wybuchowe jako miotające, należało nie obniżając ich siły znacznie zmniejszyć ich prędkość spalania.

Zagadnienie to zostało rozwiązane przez tak zwaną flegmatyzację nitrocelulozy. Proces ten polega na tym, że nitroceluloza pod działaniem niektórych rozpuszczalników zmienia swoje własności fizyczne i przekształca się w jednorodną galaretowatą masę, która po sprasowaniu /zagęszczeniu/ staje się twardym koloidem, podobnym do rogu. W związku z wysoką gęstością i lepkością rozkład wybuchowy takiej masy ma charakter prędkiego spalania. Samą nitrocelulozę otrzymujemy przez działanie odpowiednich kwasów na celulozę /celuloza - produkt otrzymany z bawełny lub drewna/, a mianowicie przez działanie kwasu azotowego i siarkowego.

W zależności od właściwości rozpuszczalników użytych do flegmatyzacji nitrocelulozy i ich wpływu na własności wybuchowe prochów, te ostatnie dzielą się na dwie następujące grupy:

1. Bezdymne nitrocelulozowe prochy, w których rozpuszczalniki nie posiadają własności wybuchowych i ich zadaniem jest tylko flegmatyzacja nitrocelulozy, po spełnieniu tej roli są one usuwane z masy prochowej, za wyjątkiem minimalnej ilości zabezpieczającej koloidalną strukturę masy.
2. Bezdymne nitroglicerynowe prochy, w których rozpuszczalnikiem jest nitrogliceryna, pozostająca po flegmatyzacji w składzie masy prochowej i tworząca trwały związek z nitrocelulozą.

Bezdymne nitrocelulozowe prochy otrzymujemy z mieszanki dwóch gatunków nitrocelulozy /Nr 1 i Nr 2/, posiadających różne własności wybuchowe, uzależnione od procentowej zawartości azotu w nitrocelulozie.

Nitroceluloza Nr 1 - zawartość azotu 13 + 13,45%.

Nitroceluloza Nr 2 - zawartość azotu 12.1 + 12,7%.

Działu określonego rodzaju i kalibru powinien odpowiadać określony rodzaj prochu. Przez odpowiednie dawkowanie nitrocelulozy Nr 1 i Nr 2, przy produkcji bezdymnych nitrocelulozowych prochów możemy uzyskać żadaną siłę i prędkość palenia się prochu.

Bezdymne nitroglicerynowe prochy. Istota flegmatyzacji przy produkcji bezdymnych nitroglicerynowych prochów jest ta sama, co przy produkcji prochów nitrocelulozowych, z tą tylko różnicą, że w obecności rozpuszczalnika żelatynę tworzą nie dwa gatunki nitrocelulozy, a nitroceluloza z nitrogliceryną. Nitroglicerynowe prochy dzielimy na balistyty i kordyty. Przy produkcji balistytów wykorzystujemy mieszankę nitrocelulozy Nr 2 i nitrogliceryny, przy produkcji zaś kordytów wykorzystujemy wysokocząstową nitrocelulozę /Nr 1/, rozpuszczając ją w mieszaninie nitrogliceryny z acetonem. Aceton w tym wypadku służy do lepszego rozpuszczenia nitrocelulozy.

Dla przeprowadzenia cenny porównawczej właściwości balistycznych nitrocelulozowych i nitroglicerynowych prochów, rozpatrzmy tabelę 2:

Tabela 2

Zasadnicze charakterystyki prochów

Charakterystyka prochu	proch dymny	proch nitrocelulozowy	proch nitroglicerynowy
kaloryczność Q_w $\frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$	585	800+900	600-4200
temperatura spalania T °K	2400	2500+2800	2800+3500
objętość gazów V_0 $\frac{\text{dm}^3}{\text{kg}}$	280	910+970	800÷860

1	2	3	4
siła prochu $f \frac{\text{kgdem}}{\text{kg}}$	$0,29 \cdot 10^6$	$0,76 \cdot 10^6$ $0,95 \cdot 10^6$	$0,9 \cdot 10^6$ $1,2 \cdot 10^6$
prędkość palenia się przy ciśnieniu $U_1 \frac{\text{mm}}{\text{sek}}$	1	0,06+0,09	0,10+0,30

Jak wynika z tabeli 2, stosując nitroglicerynowe prochy możemy uzyskać zwiększenie siły prochu o 25%, a nawet więcej.

Daje nam to możliwość stosowania ładunków małych, lecz silnych. Oprócz tego, prochy nitroglicerynowe są bardziej jednorodne, co pozwala na wykonanie większych ziaren prochu. Ponadto proch ten jest mniej higroskopijny. Mankamentem prochów nitroglicerynowych jest ich duża kaloryczność, co powoduje szybsze zużycie się przewodów luf. Dlatego też w artylerii lufowej stosuje się prochy nitroglicerynowe o niższej temperaturze spalania i mniejszej kaloryczności.

W artylerii raketowej ten brak nie ma poważniejszego znaczenia. Uwzględniając powyższe, aby zwiększyć żywotność luf stosuje się tak zwane "zimne prochy", mające stosunkowo małą kaloryczność $/600+800/ \frac{\text{kcal}}{\text{kg}}$.

2. Spalanie prochów

W procesie palenia się prochu w przestrzeni zamkniętej /działa/ lub półzamkniętej /rakiety/, energia cieplna zostaje przekazana gazom prochowym. Gazy rozszerzają się, powodują ruch pocisku i nadają mu odpowiednią prędkość.

Dokładne rozpatrzenie procesu spalania się prochu, od początkowej do końcowej fazy, omawia się w szczegółowych podręcznikach baliistyki wewnętrznej. Rozpatrzmy tylko zjawisko zapłonu i palenia się ładunku prochowego.

Zapłonem prochu nazywamy rozprzestrzenianie się płomienia po powierzchni ziarna prochowego. Prędkość, z jaką płomień rozprzestrzenia się po powierzchni ziarna

prochowego, nazywamy prędkością zapłonu prochu. Zależy ona w dużej mierze od ciśnienia, przy którym dokonuje się zapłon. Jeżeli zapłon następuje na wolnym powietrzu, przy ciśnieniu 1 atmosfery, to przebiega on stosunkowo wolno, natomiast przy ciśnieniu około 50 atmosfer, przebiega bardzo szybko, praktycznie jednocześnie na całej powierzchni ziarna prochowego.

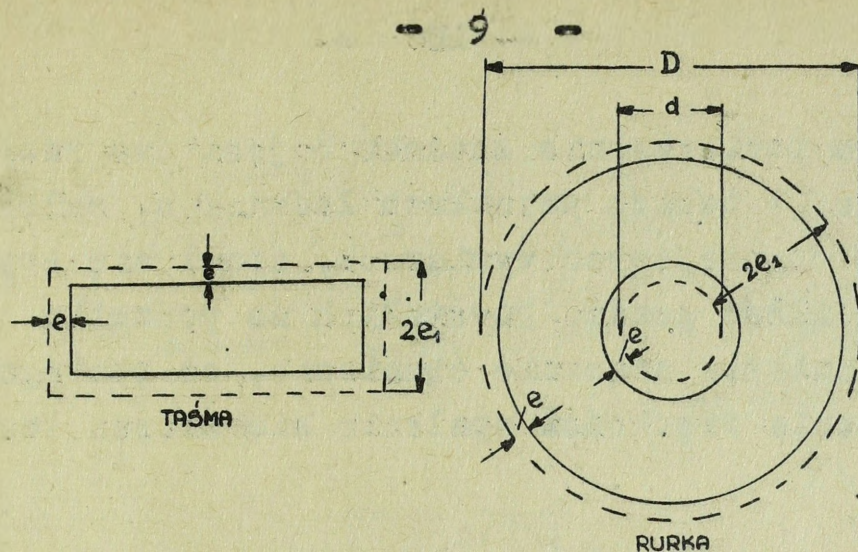
Powyższa zależność prędkości zapłonu prochu od ciśnienia, w którym on następuje, zapewnia jednoczesny zapłon całego ładunku prochowego. Dlatego każdy ładunek prochowy posiada podsypkę prochową /proch dymny/, wytwarzającą odpowiednie ciśnienie początkowe. Przez to otrzymujemy jednoczesny zapłon całego ładunku prochowego, a tym samym jednakowe prędkości początkowe pocisków przy takim samym ładunku prochowym.

Spalaniem ^{się} prochu nazywamy rozprzestrzenianie się płomienia w głąb ziarna prochowego w kierunku prostopadłym do palącej się powierzchni.

Prędkość spalania prochu mierzy się grubością ścianki prochu, spalającej się w jednostce czasu.

Zasady spalania się prochu

Spalanie ładunku prochowego przy wystrzale odbywa się - jak wiemy w bardzo krótkim czasie. Na przykład przy wystrzale ze 100 mm armaty przeciwlotniczej, proch spala się w przeciągu 0,011 sek; przy wystrzale z 85 mm armaty w przeciągu 0,006 sek; dla 57 mm automatycznej armaty, czas ten wynosi 0,005 sek, a dla 37 mm automatycznej armaty - 0,003 sek. Pomimo tak krótkiego czasu, spalanie odbywa się w myśl określonych zasad. Podstawą prawidłowości spalania się prochu jest jego jednorodność i zdolność do palenia się we wszystkich kierunkach z jednakową prędkością. Tym też objaśnia się spalanie prochu równoległymi /koncentrycznymi/ warstwami. Istota takiego spalania polega na tym, że w jednostce czasu z każdej strony ziarna prochowego spala się warstwa o określonej grubości, czyli proch pali się równomiernie ze wszystkich stron /rys.2/



Rys. 2. Spalanie się prochu równoległymi /koncentrycznymi/ warstwami.

$2e_1$ - początkowa grubość ziarna prochu,
 e - grubość spalonej warstwy.

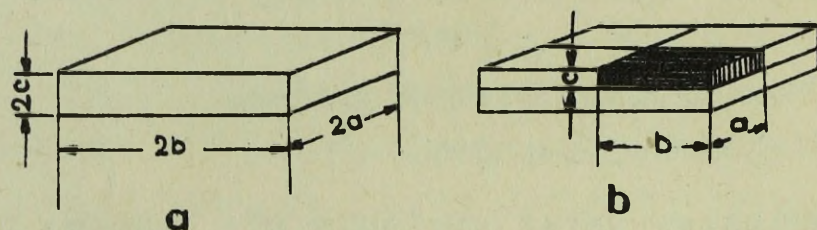
Stąd wniosek: okres spalania się ładunku prochowego składającego się z jednolitych ziaren, określa czas spalania /w danych warunkach/ jednego ziarna do połowy jego grubości. Grubością prochu nazywamy odstęp pomiędzy najbliższymi znajdującymi się, przeciwległymi, palącymi się powierzchniami ziarna prochowego.

W jednakowych warunkach spalania się prochu, ilość gazów powstałych przy spalaniu zależy od ilości /objętości/ spalonego prochu, tzn. zależy nie tylko od prędkości palenia się, ale i od wielkości palącej się powierzchni. Oznacza to, że ilość gazów powstających w jednostce czasu przy spalaniu się ziaren prochu jest proporcjonalna do palącej się powierzchni. Natomiast wielkość palącej się powierzchni uzależniona jest z kolei od wymiarów i kształtu ziaren prochowych.

Rozpatrzmy wpływ wymiarów ziaren ładunku prochowego na ilość powstających gazów prochowych w jednostce czasu. Jeżeli weźmiemy dwa ładunki prochowe o jednakowym ciężarze i kształcie ziaren, to powierzchnia spalania będzie większa w tym ładunku, który ma drobniejsze ziarna.

Rysunek 3 przedstawia dwa ładunki o jednakowym ciężarze: ładunek "a" składa się z jednego ziarna o wymiarach $2a \times 2b \times 2c$, ładunek "b" - z ziaren o połowę mniejszych /o rozmiarach $a \times b \times c$ /. Łatwo stwierdzić,

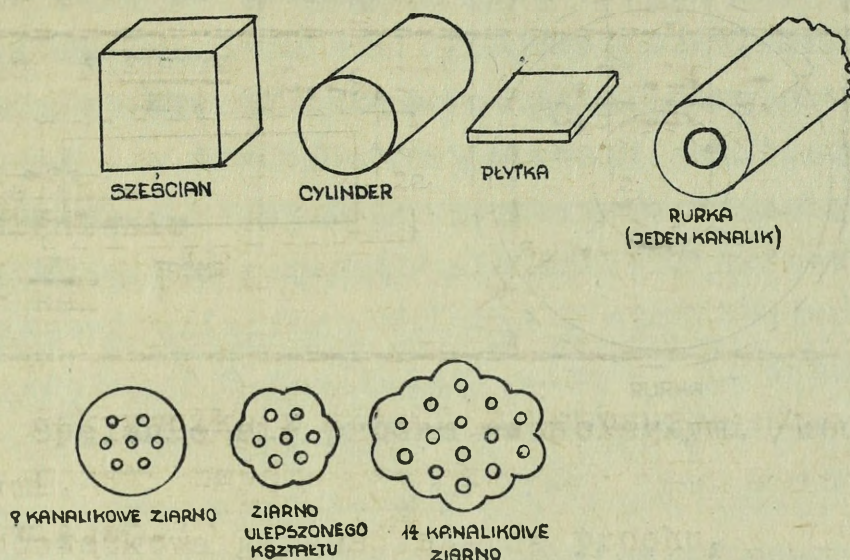
że początkowa powierzchnia ładunku b jest dwa razy większa niż ładunku a. W takich warunkach ładunek b, składający się z ziaren o mniejszych wymiarach, spali się szybciej. Ponadto duża ilość gazów, powstałych na początku spalania, podniesie znacznie ciśnienie, co pociągnie za sobą zwiększenie prędkości spalania się ziaren tego ładunku.



Rys. 3. Zależność początkowej powierzchni ładunku od grubości jego ziaren /przy stałym ciężarze/.

Na początkową powierzchnię ziaren prochu w znacznym stopniu wpływa ich kształt. Jeżeli weźmiemy dwa ładunki o jednakowym ciężarze, lecz o różnych kształtach ziaren, to początkowa powierzchnia ładunków będzie różna. Mniejsze ziarna, w kształcie sześcianu na przykład, mają w sumie większą początkową powierzchnię aniżeli ziarna w kształcie rurek o tej samej grubości. W rezultacie w początkowej fazie palenia otrzymujemy bardziej intensywne wydzielanie się gazów.

W procesie spalania powierzchnia początkowa ziaren prochu zmienia się. Zmiana ta dla różnych kształtów prochu przedstawia się różnie. Przy paleniu się ziaren mających kształt sześcianu, cylindra, taśmy /rys.4/ powierzchnia spalania zmniejsza się, ponieważ liniowe wymiary ziarna również maleją. To powoduje, że przy paleniu się - ilość gazów powstających w jednostce czasu ciągle się zmniejsza. Takie spalanie nazywa się degresywne.



Rys. 4 Kształty ziaren prochowych.

Przy paleniu się ziarna o kształcie rurkowym /rys. 2/ widzimy, jednocześnie zmniejszanie się powierzchni zewnętrznej i powiększanie powierzchni wewnętrznej.

Rozpatrzmy, w jaki sposób zmienia się powierzchnia przy paleniu się rurki o długości $2c$. Ze względu na to, że powierzchnia końców rurki zmniejsza się o 1% w stosunku do całej powierzchni, zmiany tej będziemy uwzględniali.

Początkową powierzchnia rurki

$$S_1 = \pi D + \pi d \cdot 2c$$

a powierzchnia tejże rurki po spaleniu się warstwy o grubości e , będzie równa

$$S = \pi [D - 2e] + \pi [d + 2e] \cdot 2c$$

$$S = \pi D + \pi d \cdot 2c$$

Zmiana palącej się powierzchni $\Delta S = S_1 - S = 0$ oznacza, że teoretycznie powierzchnia się nie zmieniała.

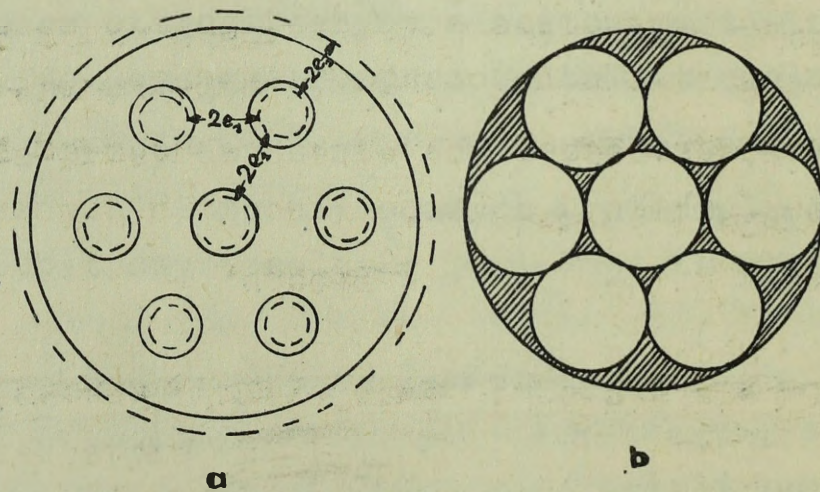
Praktycznie rzecz biorąc, powierzchnia ziarna o kształcie rurki w nieznanym stopniu zmniejsza się ze względu na to, że w procesie palenia długość rurki zmniejsza się.

Prochy o kształcie, przy których w procesie palenia powierzchnia ziaren nie zmienia się /lub zmienia się nieznacznie/ nazywamy prochami o stałej powierzchni spalania.

W praktyce najbardziej niezbędne są prochy, których powierzchnia spalania powiększa się w czasie palenia. Takie prochy nazywamy progresywnymi. Należą do nich prochy o ziarnach wielokanalikowych /rys. 4/. Ziarna najczęściej stosowanych prochów progresywnych mają 7 kanalików. /rys. 5/. Charakterystyczne dla tych prochów jest to, że zewnętrzna powierzchnia i kanalik centralny tworzą niezmienną powierzchnię palenia, natomiast 6 dodatkowych kanalików rozmieszczonych koncentrycznie powinno stale zwiększać powierzchnię spalania.

Bezsprzecznie należy uwzględnić, że progresywne palenie odbywa się do pewnego momentu, to jest do momentu rozpadu ziarna na części spalające się degenerywnie. Na przykład proch o 7 kanalikach w 15% spala się degenerywnie.

W celu zmniejszenia degenerywności spalania ziaren prochowych po rozpadzie, powierzchnię zewnętrzną formuje się niekiedy w kształcie jak na rys. 4 /ziarno o ulepszonym kształcie/ oraz wykonuje się większą ilość kanalików, jak na przykład w ładunkach dla 37 mm automatycznej armaty wzoru 1939 r. gdzie występuje proch 14 kanalikowy.

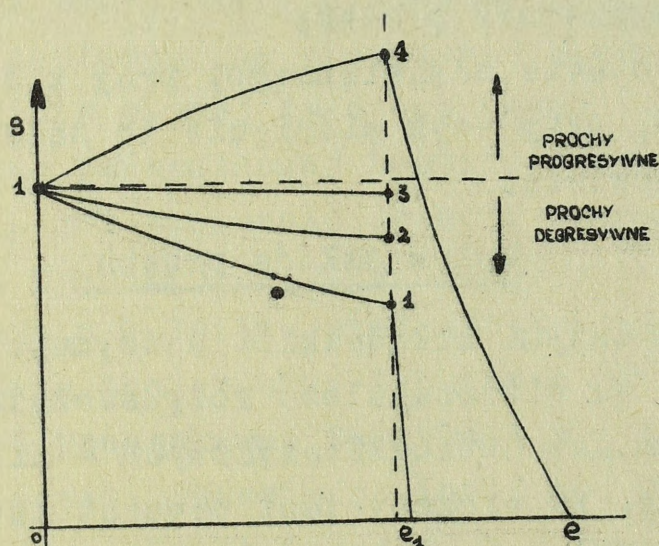


Rys. 5. Spalanie się ziarna o siedmiu kanalikach.

- a - początek palenia się,
- b - moment rozpadu ziarna.

Z poprzednich rozważań wynika, że ilość gazów powstających przy spalaniu ładunku prochowego w jednostce czasu jest proporcjonalna do palącej się powierzchni, ta zaś jest ściśle związana z wymiarami i kształtem ziaren prochowych. Rys. 6. przedstawia zależność powierzchni spalania "S" od grubości spalonej warstwy "e".

Jeżeli powierzchnię ziarna prochowego na początku palenia przyjmiemy równą jedności, to w procesie spalania takich ziaren, jak taśma widzimy ciągle zmniejszanie się powierzchni, czyli spalają się one degresywnie. W rurce natomiast powierzchnia zmienia się nieznacznie. Przy spalaniu się ziarna siedmikanalikowego powierzchnia powiększa się do momentu rozpadu ziarna. Degresywne dopalanie się prochu pokazano na rys. 6 krzywą o pionowym spadzie.



Rys. 6. Zmiana powierzchni ziaren prochu w czasie spalania.

1 - płytka; 2 - taśma, 3 - rurka; 4 - ziarno siedmikanalikowe.

Dobierając odpowiednio kształt ziaren prochu zmieniamy powierzchnię palenia i dopływ gazów, a tym samym możemy odpowiednio do potrzeb kierować zjawiskiem wystrzału. Przy strzelaniu z armat najczęściej stosujemy ziarna w kształcie rurki lub ziarna wielokanalikowe. Stosując takie prochy, możemy nadać pociskowi niezbędną prędkość początkową przy stosunkowo niedużym maksymalnym ciśnieniu.

Dla ładunków do 85 mm armaty przeciwlotniczej stosujemy prochy o ziarnie w kształcie rurki lub ziarna siedmiokanalikowe. Dla 100 mm armaty stosujemy prochy o ziarnie w kształcie rurki; 37 mm armata ma ładunek prochowy składający się z siedmiu lub czternastu kanalikowych ziaren, a 57 mm armata - z ziaren siedmiokanalikowych. Oznaczenia prochu użytego w danym ładunku podane są na łusce. Oprócz tego każda partia naboju otrzymuje metrykę, w której znajdziemy charakterystykę prochu, wykorzystanego do kompletowania danego naboju. Doświadczalnie zdołano stwierdzić, że prędkość spalania się prochu zależy głównie od następujących czynników:

- składu prochu;
- stopnia wilgotności prochu;
- temperatury prochu;
- ciśnienia zewnętrznego, przy którym zachodzi spalanie, przy czym ciśnienie to zależy od gęstości ładowania.

Wpływ składu prochu

Zasadniczymi składnikami bezdymnych prochów nitrocelulozowych są nitroceluloza rozpuszczalna i nierozpuszczalna, natomiast nitroglicerynowych - nitrogliceryna i nitroceluloza. Im większy jest procent zawartości nierozpuszczalnej nitrocelulozy lub nitrogliceryny, tym szybciej spala się proch i odwrotnie. Innym sposobem wpływania na prędkość spalania prochów jest wprowadzenie do jego składu domieszek obojętnych, tzw. flegmatyzatorów. Im większa będzie zawartość flegmatyzatora, tym wolniej będzie się spalał proch. Jako flegmatyzatory stosuje się kamforę, wazelinę itp. Na prędkość palenia się prochu również ma wpływ gęstość jego ziaren. Im większa jest gęstość ziarna, tym mniej ono posiada por, tym trudniej płomieniowi przeniknąć w głąb ziarna i tym wolniej pali się proch.

Wpływ wilgotności prochu

W procesie spalania część wydzielonego podczas reakcji ciepła zużywa się na odparowanie wody i rozpuszczal-

ników znajdujących się w składzie prochu. W wyniku, prędkość spalania prochu zmniejszy się, a tym samym zmniejszy się prędkość początkowa pocisku. Przy dużej wilgotności dochodzi nawet do niecałkowitego spalania się ładunku prochowego. Doświadczenie stwierdzone, że zmiana wilgotności prochu o 1% powoduje zmniejszenie się maksymalnego ciśnienia w przewodzie lufy o 15%, co z kolei zmniejsza prędkość początkową pocisku o 4%. Dlatego ładunki prochowe przechowuje się zgodnie z ustalonymi zasadami, zapewniającymi niezmiennosc właściwości balistycznych prochu.

Wpływ temperatury prochu /ładunku/

Zwiększenie temperatury prochu zwiększa prędkość jego spalania. Tłumaczy to tym, że bardziej nagrzana powierzchnia potrzebuje mniej energii cieplnej dla nagrzania jej do temperatury zapłonu. Tak więc każde ziarno prochu zapala się tym prędzej, im więcej było ono przed tym nagrzane. Oprócz tego, przy podwyższonej temperaturze reakcja rozkładu prochu, jak większość reakcji chemicznych, przebiega łatwiej i prędzej. Prędkość spalania się ładunku prochowego wpływa z kolei na prędkość początkową pocisku. Na przykład zmiana temperatury ładunku o 10°C powoduje zmianę prędkości początkowej pocisku w przybliżeniu o 1,1% dla 85 mm armaty przeciwlotniczej i o 1,3% dla 100 mm armaty przeciwlotniczej. Jak z powyższego wynika, dla zwiększenia dokładności strzelania niezbędne jest wprowadzanie poprawek na odchyłkę temperatury od pewnej wielkości, przyjętej za normalną $/+ 15^{\circ}\text{C}/$.

Tabela 3

Wpływ ciśnienia

Zależność prędkości palenia się prochu bezdymnego od ciśnienia.

ciśnienie w kg/cm^2	1	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500
prędkość palenia w cm/sek	0,08	5,0	7,5	10,0	12,0	13,5	15,0	16,0

Rozpatrując powyższą tabelę dochodzimy do wniosku, że im wyższe jest ciśnienie ośrodka, tym energiczniej rozpalone gazy prochowe przenikają w głąb ziarna prochowego i tym większa jest prędkość palenia się prochu. Po przeprowadzeniu dużej ilości doświadczeń z różnorodnymi prochami stwierdzono, że między ciśnieniem i prędkością palenia się prochu istnieje określona zależność

$$U = U_1 \cdot p$$

gdzie: U - prędkość spalania się prochu w cm/sek.

U_1 - prędkość spalania się prochu przy ciśnieniu 1 kg/cm²

p - ciśnienie, przy którym odbywa się palenie /w kg/cm²/.

A więc widzimy, że prędkość palenia się prochu jest wprost proporcjonalna do ciśnienia, w którym ono się odbywa. W wyniku przeprowadzonych doświadczeń ustalono również, że prędkość palenia się prochu zależy też od gęstości ładowania. Gęstość ładowania Δ jest to stosunek ciężaru ładunku Q /w kilogramach/ do objętości komory ładunkowej W_0 /w dm³/

$$\Delta = \frac{kg}{W_0 \text{ dm}^3}$$

We współczesnych działach gęstość ładowania waha się w granicach 0,6 + 0,8 kg/dm³, a dla armat przeciwlotniczych wynosi:

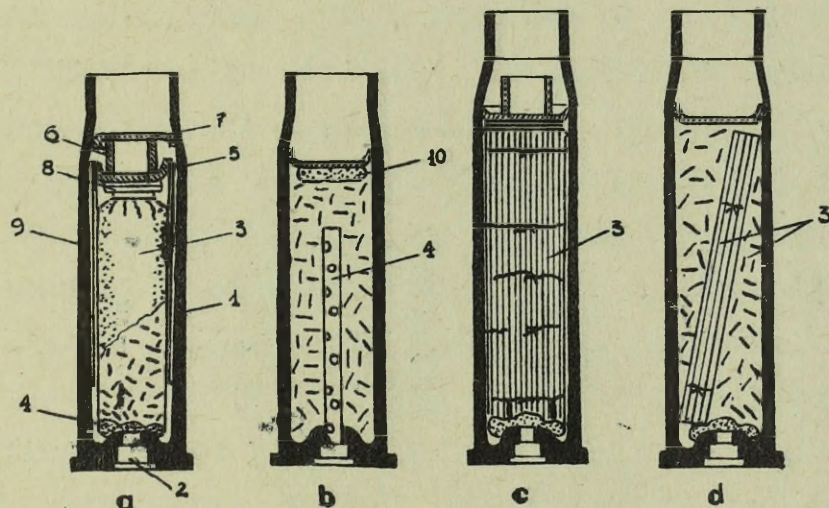
37 mm	automatyczna	armata	przeciwlotnicza	wz. 1939r.	- 0,77
57 mm	"	"	"	S-60	- 0,79
85 mm	armata	plot	- wz. 1939r.	- 0,65	
100 mm	"	"	KS - 19	- 0,69.	

Przy zwiększeniu gęstości ładowania, zwiększa się ciśnienie gazów prochowych, a wskutek tego zwiększa się i prędkość spalania prochu.

3. Ładunek prochowy i jego elementy

Ładunkiem prochowym nazywamy określoną wagowo ilość prochu, przeznaczoną do spowodowania jednego strzału.

Ładunek prochowy naboju, oprócz określonej ilości prochu, posiada szereg elementów pomocniczych, przedstawionych na rys. 7. Ciężar prochu, jego wymiary i kształt ziaren, ustala się na podstawie obliczeń balistycznych w taki sposób, ażeby zapewnić najlepsze wykorzystanie danego ładunku prochowego przy strzelaniu z danego działa. Ponieważ prochy różnych partii tego samego znaku różnią się swoimi własnościami balistycznymi, to praktycznie wyboru ciężaru prochu ładunków prochowych dokonuje się drogą doświadczalną przez strzelanie na poligonach.



Rys. 7. Ładunki prochowe naboju zespolonych.

- 1 - łuska; 2 - zapłonnik; 3 - ładunek prochowy;
- 4 - podsypka prochowa; 5 - krążek tekturowy;
- 6 - cylinder; 7 - przybitka; 8 - odmiedzacz;
- 9 - flegmatyzator; 10 - przyśmiewacz.

Celem takich strzelań jest zapewnienie jak najlepszego wykorzystania ładunku prochowego dla uzyskania wymaganej prędkości początkowej pocisku przy takim ciśnieniu gazów prochowych, które jest dopuszczalne ze względu na wytrzymałość lufy i pocisku. Dobór ciężaru ładunku nowej partii prochu dokonuje się praktycznie przez strzelanie i dopiero się tak, ażeby uzyskać niezbędną prędkość początkową pocisku, taką, jaką daje ładunek wzorcowy. "Wzorcowym" nazywa się ładunek o znanych własnościach balistycznych, przyjętych jako zasadnicze. Zdawałoby się, że przy takim doborze ładunków naboje używane do

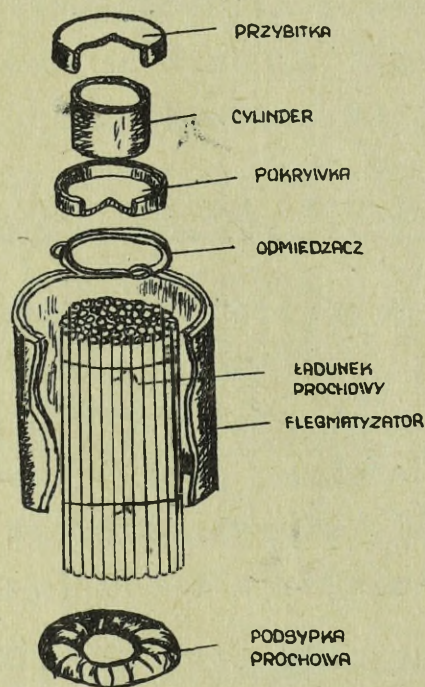
strzelań powinny mieć jednakowe prędkości początkowe pocisków, niezależnie od tego, z jakiej partii prochów zostały one wykonane. Praktycznie rzecz biorąc, jednostki mogą otrzymywać partię naboju z tzw. poprawkami prochowymi tj. ze wskazaniem w metryce, że dana partia ładunków ma odchyłkę prędkości początkowej, dla której należy uwzględnić odpowiednią poprawkę w czasie strzelania. Wprowadzanie tej poprawki jest konieczne ze względu na to, że proch zmienia swoje własności balistyczne w okresie pomiędzy wyprodukowaniem go i użyciem do sporządzenia ładunków. Proces fizyczno-chemiczny, zapoczątkowany przy produkcji prochu w dalszym ciągu zachodzi, chociaż w o wiele mniejszym stopniu; np. ulatnia się rozpuszczalnik, zwiększa się wilgotność, zmienia się struktura masy prochowej. Nawet już po pełnym ukończeniu ładunków prochowych, odbywa się powolna zmiana ich własności balistycznych.

W związku z tym należy mieć na uwadze, że poprawka może z biegiem czasu zmieniać się i nie odpowiadać warunkom strzelania. Dlatego najdokładniejsze jest określanie danej poprawki przy pomocy polowej stacji balistycznej na stanowisku ogniowym, bezpośrednio przed strzelaniem. Jeżeli jednostka nie posiada polowej stacji balistycznej i z jakichkolwiek przyczyn nie znamy wielkości poprawki, to sprawdzenie prędkości początkowych odbywa się poprzez strzelanie do punktów kontrolnych.

Pod względem konstrukcji, w zależności od typu naboju, do którego jest on przeznaczony, ładunki prochowe dzielimy na stałe i zmienne. W artylerii przeciwlotniczej stosują się w zasadzie naboje zespolone ze stałymi ładunkami prochowymi. W nabojach zespolonych ładunki prochowe mogą być umieszczone bezpośrednio w łusce lub w woreczku jedwabnym, czy też bawełnianym. Woreczki służą jako osłona ładunku prochowego i jego części oraz zapobiegają przesuwaniu się ładunku prochowego. W nabojach składanych, woreczkowych, woreczek nie jest elementem pomocniczym ładunku prochowego, lecz stanowi jedną z zasadniczych części naboju artyleryjskiego. Ładunki prochowe w łusce zamykamy pokrywką. Jeżeli ładunek prochowy nie oalkowicie zapełnił łuski i między dnem pocisku a pokrywką mamy wolną przestrzeń, to wkładamy cylinder kartonowy opierający się jednym końcem o dno pocisku, a drugim o pokrywkę.

Przez to całkowicie eliminujemy możliwość przesunięcia się ładunku prochowego w łusce /rys. 8/.

Dla zabezpieczenia przerywania się gazów prochowych między pociskiem i lufą, do momentu wośnięcia się pierścienia wiodącego w gwinty, służy przybitka lub uszczelniacz. Przebitkę wkłada się w łuskę do góry dnem /rys.8/ i krawędzią do wnętrza łuski, aż do dociśnięcia umieszczonego pod nią ładunku prochowego.



Rys. 8. Elementy naboju artyleryjskiego.

Podsypką prochową nazywamy niewielką ilość prochu łatwopalnego /najczęściej dymnego/ umieszczonego pomiędzy zapłonnikiem a ładunkiem prochowym. Podsypka prochowa służy do wzmocnienia impulsu zapłonnika, zapewniając w ten sposób szybkie i pewne zapalenie się całego ładunku. Podsypki prochowe mieszczą się w oddzielnych woreczkach, a bywają też rurkowe. Rurkowe podsypki wykonane są w kształcie rurki z otworami i mocuje się je na dnie łuski. Rurkowe podsypki stosowane są na przykład w nabojach do 85 mm armaty przedwlotniczej.

Flegmatyzatory służą do zmniejszania zużycia lufy przy strzelaniu. Są to papierowe opakowania, przesycone specjalną substancją w które zawija się ładunek prochowy. W czasie wystrzału substancja flegmatyzatora topi się i zmieszawszy się z gazami prochowymi rozpryskuje po po-

wierzchni lufy, tworząc warstwę chroniącą metal lufy od szkodliwych wpływów gazów prochowych. Użycie flegmatyzatorów w znacznym stopniu zmniejsza zużycie przewodów luf /średnio o połowę/.

Odmiedzacze służą do usunięcia namiedzenia luf powstającego od pierścieni wiodących pocisku. Do tego celu używa się najczęściej drutu z ołowiu lub cyny, albo też ze stopów ołowiu z cyną i ołowiu z cynkiem. Odmiedzacz wkłada się do łuski po włożeniu ładunku prochowego, lub przymocowuje się do woreczka z góry. Działanie odmiedzaczy polega na tworzeniu łatwotopliwych związków z miedzią, które stosunkowo łatwo usuwane są następnym wystrzelonym pociskiem, lub przy czyszczeniu lufy.

4. Wystrzał. Okresy wystrzału

W balistyce wewnętrznej wystrzałem nazywamy proces palenia się ładunku prochowego, ruch masy gazów i spowodowany tymi gazami ruch pocisku w przewodzie lufy oraz na niewielkim odcinku poza przewodem lufy.

Przy wystrzale energia ładunku prochowego przekształca się w energię kinetyczną ruchu pocisku.

Zjawisko wystrzału trwa od 0,003 do 0,001 sek. niemniej jednak wszystkie procesy, które jako całość stanowią wystrzał, zachodzą w ściśle określonej kolejności, w myśl pewnych określonych praw. Charakterystyczne dla zjawiska wystrzału jest to, że spalanie prochu odbywa się w zmiennej objętości, ze względu na przesuwanie się pocisków w przewodzie lufy. Przy wystrzale zachodzi szereg złożonych zależności pomiędzy poszczególnymi czynnikami, charakteryzującymi zjawisko wystrzału.

Rozpatrując zjawisko wystrzału możemy go podzielić na następujące okresy, które kolejno zostaną omówione.

Okres wstępny

Przy wystrzale płomień ognia z zapłonika lub innego urządzenia zapłonowego przenika do podsypki prochowej. Podsypka prochowa potęguje płomień ognia i wytwarza ciśnienie 20-50 atmosfer, które niezbędne jest dla zapewnie-

nią jednoczesnego zapalenia się całego ładunku prochowego.

W pierwszym momencie spalanie prochu odbywa się przy stałej objętości, gdyż ciśnienie jest jeszcze niewystarczające, aby ruszyć pocisk z miejsca. W armatach o nowej lufie ciśnienia to określa się jako siłę niezbędną do wcisnięcia pierścienia wiodącego pocisku w bruzdy przewodu lufy. W zależności od ciężaru pocisku, konstrukcji wnętrza przewodu lufy i pierścienia wiodącego, ciśnienie to wynosi 250 - 500 at.^{x/} Ciśnienie niezbędne do pokonania bezwładności pocisku i oporu pierścienia wiodącego wciskającego się w bruzdy przewodu lufy nazywamy ciśnieniem forsowania.

W lufach, mających w wyniku wypalenia się wydłużoną komorę nabojową, ruch pocisku zaczyna się trochę wcześniej. Uwzględniając małą wielkość odcinka, który przebywa pocisk, do momentu początku wciskania się w bruzdy pierścienia wiodącego oraz złożoność procesów zachodzących w początkowym momencie ruchu pocisku, dla uproszczenia rozważań założymy, że pocisk do momentu całkowitego wcisnięcia się jest nieruchomy.

Okres, w którym zachodzi palenie się prochu, zanim ruszy pocisk, nazywamy okresem wstępnym procesu strzału.

Pierwszy okres

Pierwszy /zasadniczy/ okres wystrzału zaczyna się od momentu uzyskania ciśnienia forsowania. Zasadniczym nazywamy go dlatego, że w tym okresie gazy prochowe wykonują zasadniczą część /70 - 75%/ ogólnej pracy.

W początkowym momencie pierwszego okresu wystrzału ~~wieznacznna i przyrost~~ ~~objętości gazów przestrzeni zapocisk.~~ jest ~~prędkość pocisku jest~~ /większy, aniżeli powiększenie się tej przestrzeni, w wyniku czego obserwujemy szybki wzrost ciśnienia gazów prochowych. W momencie kiedy pocisk przejdzie w przewodzie lufy odcinek mniej więcej równy 2+7 kalibrów /dla różnych dział ta wielkość jest różna/ prędkość pocisku osiągnie taką wielkość, że zwiększanie się przestrzeni zapociskowej następować będzie szybciej od przyrostu objętości gazów prochowych. Od tego momentu ciśnienie gazów zaczyna zmniejszać się. Jednak bez względu na to, że ciśnienie gazów zaczyna się zmniejszać, prędkość pocisku

x/ Dla obliczeń przyjmuje się równe 300 atmosfer.

nie maleje, a na odwrót nadal się powiększa, chociaż mniej intensywnie. Wywołane jest to dużym zasobem energii gazów, zamkniętych w przestrzeni zapociskowej.

Pierwszy okres strzału kończy się w momencie, gdy pocisk przejdzie $0,5 + 0,8$ długości gwintowanej części przewodu lufy, tj., gdy zakończy się palenie ładunku prochowego.

Drugi okres

W ciągu drugiego okresu dopływ nowych porcji gazów nie następuje. Ruch pocisku powoduje zwiększenie się przestrzeni zapociskowej, zmniejszając tym samym ciśnienie w przewodzie lufy. Pod wpływem jednak prężności gazów pocisk nadal zwiększa swoją prędkość. W miarę przybliżania się pocisku do wylotu lufy przyspieszenie jego zmniejsza się, lecz nadal jest ono dodatnie.

W momencie wylotu pocisku z przewodu lufy, tj. gdy dno pocisku mija płask wylotu lufy, pocisk posiada tzw. prędkość wylotową V_w . Ciśnienie w tym momencie wynosi 500 - 900 atmosfer. W momencie opuszczenia przewodu lufy przez pocisk kończy się drugi okres wystrzału.

Trzeci okres

/okres działania gazów poza lufą/

Po opuszczeniu przez pocisk przewodu lufy, uchodzące w ślad za nim z dużą prędkością gazy tworzą strumień popychający pocisk i nadający mu przyspieszenie na odcinku kilku metrów drogi w powietrzu dopóty, dopóki ciśnienie to nie zostanie zrównoważone przez siłę oporu powietrza. Jest to moment, w którym pocisk posiada największą prędkość, gdyż później na pocisk zaczyna już działać siła oporu powietrza.

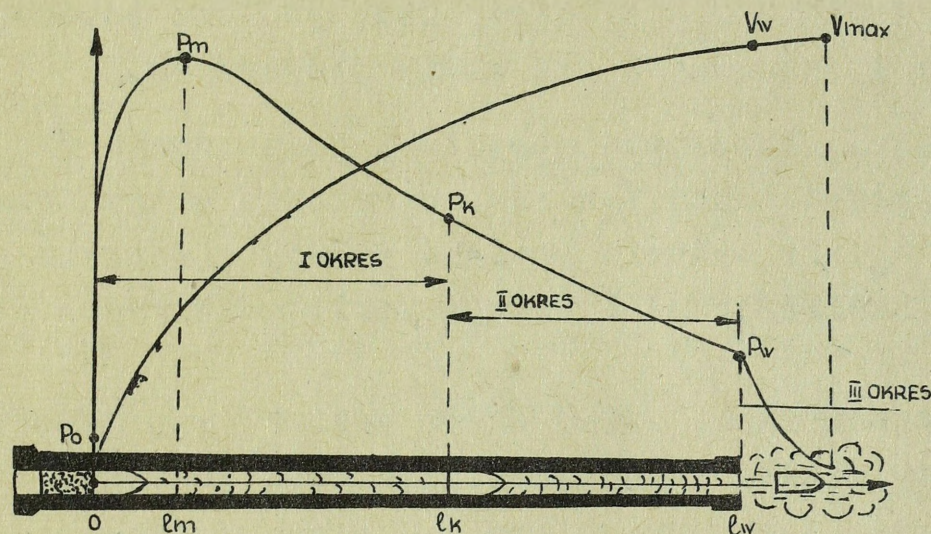
Okres od opuszczenia przez pocisk przewodu lufy do zakończenia działania gazów na pocisk, nazywa się okresem działania gazów poza lufą.

Pod koniec okresu pocisk osiąga maksymalną prędkość. Ze względu jednak na to, że mało się ona różni od wyloto-

wej i że badanie działania gazów poza lufą jest niezmiernie utrudnione, w praktyce przyjmujemy, że prędkość maksymalna pocisku jest równa prędkości w momencie opuszczania lufy.

Krzywa ciśnienia i krzywa prędkości.

Przebieg zmian ciśnienia i prędkości pocisku w przewodzie lufy przedstawiono graficznie na rysunku w postaci krzywych ciśnienia i prędkości.



Rys. 9. Krzywe prędkości pocisku i ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy..

Przy wykreślaniu krzywych na osi odciętych odkładamy drogę, jaką przebył środek płasku dennego pocisku wzdłuż przewodu lufy, na osi rzędnych - wartości ciśnień, wywieranych na płask denny pocisku i prędkości pocisku w odpowiednich punktach jego drogi.

Dla dokładniejszego rozpatrzenia krzywej ciśnienia podzielimy odcinek drogi pocisku w przewodzie lufy na części.

1. W punkcie 0 droga pocisku i jego prędkość równe są zeru. Krzywa ciśnień podnosi się od punktu 0 do punktu P_0 . Odcinek OP_0 odpowiada wstępnemu okresowi zjawiska wystrzału, kiedy to pocisk pozostaje w miejscu, a ciśnienie wzrasta do ciśnienia forsowania.
2. Na odcinku drogi pocisku od punktu 0 do punktu l_m zachodzi szybki wzrost ciśnienia do maksymalnego w punkcie P_m , co wyjaśnia się w tym, że zwiększanie się przestrzeni zapociskowej jest mniejsze od przyrostu ilości gazów prochowych.

3. Na odcinku drogi pocisku od l_m do l_k krzywa ciśnień opada w dół. To wskazuje na to, że objętość przestrzeni zapociskowej wzrasta szybciej od objętości gazów prochowych. W punkcie l_k kończy się palenie ładunku prochowego. Ciśnienie w tym czasie wynosi P_k .
4. Na odcinku l_k l_w krzywa w dalszym ciągu opada, lecz jej charakter różni się od krzywej na odcinku l_m l_k . Wynika to stąd, że palenie się prochu zostało już zakończone w punkcie l_k , a dalszy ruch pocisku powoduje bardziej swobodne rozszerzanie się gazów prochowych.

Punkt l_w odpowiada momentowi opuszczenia przewodu lufy przez płask denny pocisku. Ciśnienie w tym momencie równe jest P_w . Po wylocie pocisku z lufy ciśnienie gazów prochowych szybko spada i osiąga poziom ciśnienia atmosferycznego.

Na przestrzeni całej drogi pocisku w przewodzie lufy widzimy ciągle narastanie prędkości pocisku.

Narastanie prędkości na całej długości drogi nie jest stałe ze względu na zmienność ciśnienia na poszczególnych odcinkach drogi. Przy wylocie pocisk osiąga prędkość wylotową V_w .

Po rozpatrzeniu krzywej prędkości pocisku w przewodzie lufy dochodzimy do wniosku, że wydłużenie luf nie może doprowadzić do znacznego zwiększenia prędkości początkowej pocisku bez zmiany warunków ładowania. Np. zwiększenie gwintowanej części lufy 85 mm armaty przeciwlotniczej o 1,5 raza zwiększyłoby prędkość wylotową pocisku tylko o 75 m/sek.

Prędkość wylotowa może być zwiększona przez zmniejszenie ciężaru pocisku /przy jednakowym ciężarze ładunku prochowego/. Załóżmy, że energia w momencie wylotu przy zmniejszeniu ciężaru pocisku nie zmniejszy się tj.

$$\frac{mV_w^2}{2} = \frac{m_1 V_{w1}^2}{2}$$

a stąd

$$V_{w1} = V_w \sqrt{\frac{m}{m_1}} = V_w \sqrt{\frac{q}{q_1}}$$

Przykład: Prędkość początkowa pocisku 100 mm armaty przeciwlotniczej, o ciężarze 15,6 kg. wynosi 900 m/sek.

Określić prędkość początkową pocisku, jeśli do strzelania użyjemy pocisku o ciężarze 10 kg i 7,8 kg.

Rozwiązanie:

$$V_{10} = V_w \sqrt{\frac{q}{q_0}} = 900 \sqrt{\frac{15,6}{10}} = 996 \text{ m/sek} \quad 1000 \text{ m/sek}$$

$$V_{7,8} = 900 \sqrt{\frac{15,6}{7,8}} = 1260 \text{ m/sek.}$$

Dane doświadczalne, otrzymane przy strzelaniu z broni piechoty wykazały, że przy strzelaniu lekkimi kapturkami zamiast pocisków karabinowych otrzymane prędkość początkową równą 2600 - 2800 m/sek.

Prędkość, jaką mają gazy prochowe wyrzucane z przewodu lufy przy strzelaniu ładunkiem prochowym bez pocisku z armaty średniego kalibru, wynosi 1500 - 1600 m/sek.

Z powyższych rozważań wynika, że zwiększanie prędkości pocisku przez zmniejszenie jego ciężaru też ma swoją granicę. Oprócz tego należy uwzględnić i to, że zmniejszenie ciężaru pocisku prowadzi do szybkiego spadku prędkości pocisku na torze lotu i tym samym zmniejsza donośność. Obecnie stosuje się metodę zwiększania prędkości początkowej pocisku przez zmniejszenie jego ciężaru przy strzelaniu np. pociskami podkalibrowymi. Używa się jej jednak przy strzelaniu do celów opancerzonych na niewielkich odległościach.

Jak widzimy, przy projektowaniu dział zachodzi konieczność odpowiedniego doboru charakterystyk balistycznych, wymogów taktyczno-technicznych oraz możliwości technologicznych.

Dla poszczególnych wzorów dział przyjęto pewne najbardziej dogodne charakterystyki balistyczne podane w tabeli 4.

Tabela 4.

Zasadnicze charakterystyki balistyczne poszczególnych armat przeciwlotniczych.

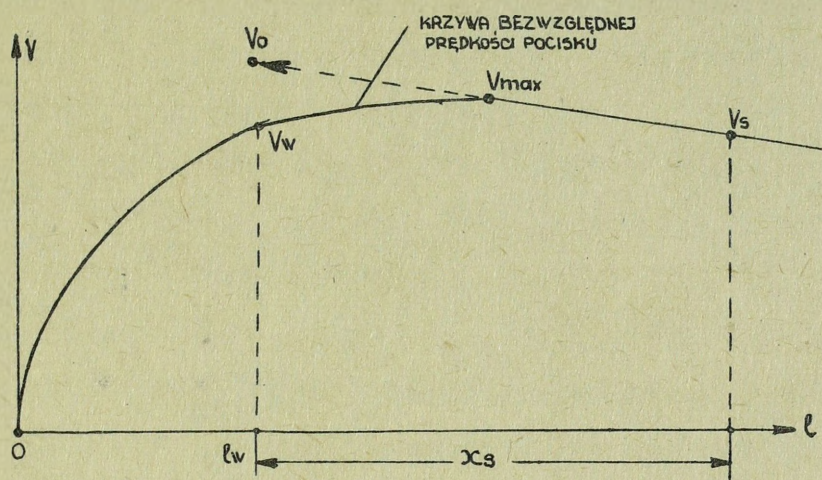
Kaliber	37 mm	57 mm	85 mm	100 mm
Zasadnicze charakterystyki balistyczne				
Długość części gwintowanej lufy w mm	2054	3560	3500	4630
Prędkość początkowa w m/sek.	880+900	1000	800	900
Ciężar pocisku w kg	0,732	2,8	9,2	15,6
Ciężar ładunku prochowego w kg	0,2-0,21	1,2	2,48	5,5
Gęstość ładowania w kg/dm ³	0,77	0,79	0,65	0,69
Maksymalne ciśnienie w kg/cm ²	2800	3100	2550	3066
Ciśnienie wylotowe w kg/cm ²	-	830	830	969

5. Początkowa i wylotowa prędkość pocisku

Rozpatrując okresy wystrzału ustaliliśmy, że prędkość wylotowa pocisku jest to prędkość w momencie, gdy płask denny pocisku opuszcza lufę. Ustaliliśmy również, że po wyjściu pocisku z przewodu lufy gazy nie przestają nań działać i nadają mu jeszcze przyspieszenie na odcinku kilku metrów drogi w powietrzu. Jest to moment, w którym pocisk posiada prędkość maksymalną V_{max} , gdyż później wskutek oporu powietrza prędkość ta zaczyna maleć /rys.10/ Prędkość maksymalna V_{max} jest większa od wylotowej prędkości pocisku V_w o 2-5 m/sek.

Ze względu na to, że punkt w którym pocisk osiąga prędkość maksymalną leży poza lufą i odległość tego punktu może się w pewnych granicach zmieniać, przy obliczeniach balistycznych jako punkt wyjściowy przyjmujemy środek wylotu lufy. Nie możemy bowiem za początek układu współ-

rzędnych brać punktu, którego położenia nie jesteśmy w stanie dokładnie wyznaczyć. Dlatego też prędkość początkową V_0 bierzemy nieco większą od V_{max} .



Rys. 10. Wyznaczenie prędkości początkowej pocisku.

Przyjęcie takiej prędkości początkowej spowodowane jest tym, że pocisk po wylocie z lufy napotyka na opór powietrza, hamujący jego ruch. Aby otrzymać na torze punkt, w którym pocisk posiada V_{max} powinniśmy przyjąć, że w punkcie początkowym /w punkcie wylotu/ prędkość początkowa V_0 pocisku jest nieznacznie większa od prędkości maksymalnej V_{max} .

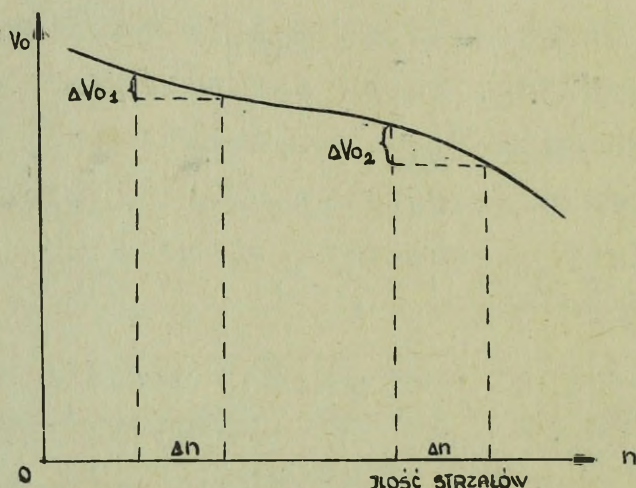
Wartość prędkości początkowej określamy doświadczalnie przy pomocy chronografów na pewnej odległości x_s od punktu wylotu, a następnie zakładając proporcjonalny spadek prędkości na tym odcinku, wyznaczamy prędkość początkową V_0 .

Rys. 10. przedstawia wyznaczanie prędkości początkowej wyżej omówionym sposobem. Otrzymana w ten sposób prędkość początkowa pocisku V_0 jest większa od V_{max} tzn. jest fikcyjna lub umowna.

W czasie eksploatacji działa wartość prędkości początkowej pocisku zmienia się w zależności od warunków eksploatacji /reżimu ognia, jakości czyszczenia luf itp/ i ilości oddanych strzałów.

Jedną z zasadniczych przyczyn zmiany prędkości początkowej pocisku jest zużycie się przewodu lufy.

Zużycie się początkowego odcinka części gwintowanej przewodu lufy doprowadza do wydłużenia komory ładunkowej. Wynikiem tego jest zmniejszenie gęstości ładowania i ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy. Oprócz tego zużycie się gwintowanej części lufy powoduje przerywanie się gazów prochowych, ponieważ pierścienie wiodące nie zabezpieczają już w dostatecznym stopniu hermetyczności. A to z kolei wpływa na bardziej intensywne zużycie się przewodów luf. Przy spadku prędkości początkowej pocisku o 8 + 10% zużycie przewodu lufy postępuje bardziej intensywnie, aniżeli przy mniejszym spadku prędkości. Z rysunku 11 wynika, że przy jednakowej ilości wystrzałów N , prędkość początkowa pocisku, dla lufy z której oddano większą ilość strzałów, zmniejsza się o większą wartość niż przy lufie z której oddano mniej strzałów tj. ΔV_{o_2} jest większa niż ΔV_{o_1}



Rys. 11. Zależność zmiany prędkości początkowej pocisku od ilości oddanych strzałów.

Zmianę prędkości początkowej spowodowaną zużyciem przewodu lufy przy strzelaniu uwzględnia się jako poprawkę w przeliczniku. Wielkość odchyłki prędkości początkowej spowodowanej wydłużeniem komór ładunkowych $\Delta V_{o_1} / \%$ określa się kilkoma sposobami: przy pomocy polowej stacji balistycznej, na podstawie wielkości wydłużenia komory ładunkowej oraz na podstawie ilości oddanych strzałów.

Praktyka eksploatacji lufy wykazuje, że w nowych lufach zmiana prędkości początkowej przebiega bardziej

intensywnie niż w lufach o średnim zużyciu. Dlatego też w niektórych tabelach strzelniczych podaje się prędkość początkową dla luf o średnim zużyciu. W wyniku późniejszego poprawki w początkowym okresie eksploatacji są dodatnie, a po większej ilości oddanych strzałów ujemne. Taki sposób uwzględniania poprawek daje możliwość dokładniejszego określenia poprawki dla luf o średnim zużyciu.

6. Wpływ gatunków prochu i warunków strzelania na ciśnienie gazów prochowych i prędkość pocisku.

Kształt i wymiary ziaren prochowych ładunku wydatnie wpływają na przebieg krzywej ciśnienia i prędkości pocisku. Na podstawie doświadczeń wykonanych z jednakowymi pod względem wagowym i gatunkowym ładunkami prochowymi, lecz różnymi pod względem grubości i kształtu ziaren prochowych, wyciągnięto następujące wnioski.

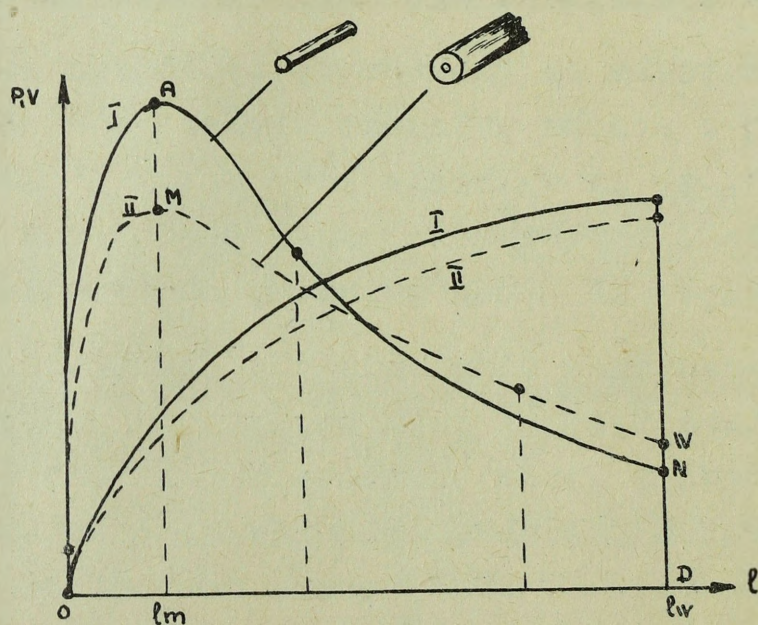
Przy jednakowym kształcie prochu ładunek o drobniejszym ziarnie prochu daje maksymalne ciśnienie prędzej i spala się szybciej /krzywa I rys. 12/ niż ładunek o grubszym ziarnie spalającym się wolniej /krzywa II/.

Spadek ciśnienia za punktem maksymalnego ciśnienia zachodzi prędzej u prochu mającego cieńsze ziarno. Doprowadza to do tego, że na wykresie krzywa I i II krzyżują się i u wylotu krzywa I szybko spalającego się prochu przejdzie niżej aniżeli krzywa II wolno palącego się prochu.

Szybsze narastanie ciśnienia dla drobnoziarnistego prochu tłumaczy się tym, że jego początkowa powierzchnia jest większa i dopływ gazów prochowych jest bardziej intensywny na początku palenia. Zwiększenie ciśnienia z kolei sprzyja szybszemu paleniu się prochu, co pociąga za sobą dalsze zwiększenie dopływu gazów.

Z analizy krzywych ciśnień wytwarzanych przez gazy drobnoziarnistego i gruboziarnistego prochu widzimy, że powierzchnia /rys.12/ ograniczona krzywą I, rzędną punktu A i osią I tj. powierzchnia AOND, jest większa od powierzchni OMWD. Z tego wynika, że średnie ciśnienie gazów prochowych

jest większe dla prochów drobnoziarnistych. Dlatego też prędkość pocisku w tym wypadku uzyskujemy większą. Na wykresie krzywa prędkości I przebiega wyżej od krzywej II. Na pierwszy rzut oka zdawałoby się, że bardziej korzystne jest używanie drobnoziarnistych prochów, gdyż przy jednakowym ciężarze ładunku pocisk uzyskuje większą prędkość. Jednak należy mieć na uwadze, że nieznaczne zwiększenie prędkości pocisku uzyskuje się kosztem znacznego zwiększenia maksymalnego ciśnienia w przewodzie lufy /ciśnienie maksymalne wzrasta mniej więcej o 4 razy szybciej niż prędkość początkowa/, a to niestety, jest bardzo niekorzystne. Dlatego też, gdy stawiamy sobie zadanie otrzymania określonej wartości maksymalnego ciśnienia, to chcąc uzyskać większą prędkość początkową pocisku, stosujemy proch gruboziarnisty. Przy tym należy pamiętać o tym, że proch grubszy pali się dłużej /krzywa II/ i należy dobrać ziarna o takiej grubości, które zabezpiecząby całkowite spalanie się prochu w przewodzie lufy.



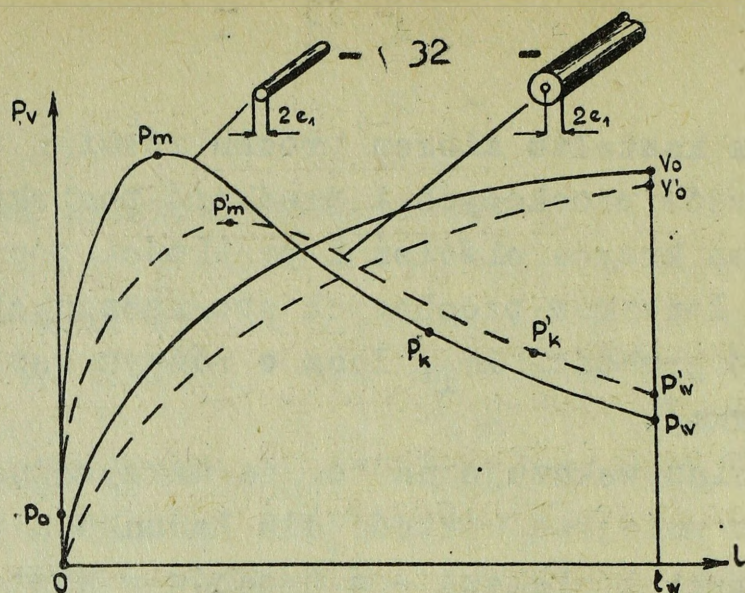
Rys. 12. Krzywe ciśnienia i prędkości pocisku dla ładunków o jednakowym kształcie ziaren prochu, lecz różnej grubości.

Zmiana kształtu ziaren prochu również wpływa na ciśnienie gazów prochowych i prędkość pocisku. Na rys. 13 przedstawiono krzywe ciśnień i prędkości początkowych pocisku dla ładunków prochowych sporządzonych z prochu o jednakowej grubości $2e_1$, lecz o różnym kształcie /pręcik, rurka/.

Krzywe ciśnień wskazują na to, że maksymalne ciśnienie będzie miało mniejszą wartość dla ładunku z prochu o kształcie rurki i większą - z prochów w kształcie pręta. Większa wartość ciśnienia dla prochu prętowego tłumaczy się tym, że posiada on większą powierzchnię ziaren w początkowym okresie palenia i tym samym powstaje większa ilość gazów. Dalszy szybki spadek ciśnienia tłumaczy się intensywniejszym zmniejszaniem powierzchni palenia. Z wykresu wynika, że proch degresywny spala się szybciej /na rys. 13 punkt P_k dla pręta - przesunięty w lewo/.

Rozpatrując krzywe prędkości pocisku dochodzimy do wniosku, że pocisk otrzymuje większą prędkość początkową przy zastosowaniu prochu o kształcie pręta. Dlatego też wydaje nam się, że powinniśmy stosować prochy degresywne. Jednak przy dokładnym przeanalizowaniu krzywych ciśnień i prędkości przekonujemy się, że nieznaczne zwiększenie prędkości początkowej pocisku uzyskujemy przy dość znacznym zwiększeniu ciśnienia w przewodzie lufy. Dlatego też korzystniejsze jest stosowanie prochów o mniejszej degresywności.

Doświadczając kształt prochu do ładunków należy uwzględnić cały szereg czynników: ciężar pocisku, długość lufy, skład prochu itp. Dlatego też w każdym konkretnym przypadku dobieramy najbardziej korzystny wariant, dający nam dużą prędkość początkową przy najmniejszym ciężarze ładunku i możliwie najmniejszej wartości maksymalnego ciśnienia.



Rys. 13. Krzywe ciśnień i prędkości dla ładunków o różnym kształcie prochu, lecz jednakowej grubości ścianek.

Na ciśnienie i prędkość poważny wpływ ma również temperatura ładunku i temperatura lufy. Zwiększenie temperatury ładunku prochowego powoduje zwiększenie maksymalnego ciśnienia w przewodzie lufy, a tym samym zwiększenie prędkości początkowej pocisku.

Wpływ temperatury lufy polega na tym, że przy strzelaniu, na przykład w zimie, znaczna część energii cieplnej zużywa się na nagrzanie lufy, co oczywiście obniża zarówno ciśnienie gazów w przewodzie lufy, jak i prędkość początkową pocisku. Zauważono, że podczas strzelania przy niskich temperaturach większość pierwszych salw – to niedoloty. W doświadczalnych strzelaniach, w których konieczna jest jednakowa prędkość początkowa, pierwsze strzały /1-2/ oddaje się dla nagrzania lufy.

Strzelanie z lufy nagrzanej w granicach norm określonych instrukcją strzelania, praktycznie nie wpływa na zmianę prędkości początkowej. Dla armat małego i średniego kalibru dopuszczalna temperatura nagrzania się lufy wynosi $350-450^{\circ}\text{C}$ u wylotu. Daną temperaturę bierzemy u wylotu ze względu na to, że w tym miejscu ścianki lufy są najcieńsze i najbardziej intensywnie się nagzewają.

Strzelanie z lufy nagrzanej powyżej wskazanych norm powoduje gwałtowny spadek ciśnienia gazów prochowych, prędkości początkowej i szybkie zużycie przewodu lufy. Przyczyną zmniejszenia żywotności luf i prędkości początkowej pocisku przy przegrzanej lufie jest to, że przy

nagrzaniu lufy powyżej 350-450°C następuje rozszerzenie się wewnętrznej średnicy lufy i tworzy się szczelina szerokości około 0,5 mm. Przy takiej szczelinie nie może być mowy o hermetyczności przestrzeni zapociskowej. Następuje przerywanie się gazów przed pocisk, co powoduje zmniejszenie ciśnienia w przewodzie lufy i prędkości początkowej oraz intensywniejsze wypalanie się przewodu lufy. Oprócz tego zwiększa się rozrzut pocisków.

Aby uniknąć przegrzania lufy, a co za tym idzie zwiększyć jej żywotność oraz dokładność strzelania, trzeba przestrzegać norm ogniowych, podanych w tabelach reżimu ognia.

ROZDZIAŁ II
Balistyka zewnętrzna

7. Wiadomości wstępne

Jak już wspomniano, po wylocie pocisku z lufy, gazy prochowe na pewnym odcinku działają nadal na pocisk, zwiększając jego prędkość. Pomimo to, jako początek toru lotu pocisku przyjmuje się środek wylotu lufy, w którym pocisk posiada umowną prędkość - prędkość początkową.

Balistyka zewnętrzna rozpatruje ruch pocisku zakładając, że pocisk wiruje dookoła swej osi i że działają na niego dwie siły:

- siła ciężenia pocisku, równa jego ciężarowi q ,
- siła oporu powietrza R .

Zasadniczym zadaniem balistyki zewnętrznej jest poznanie i ustalenie praw ruchu pocisku w powietrzu, z uwzględnieniem wpływu zmiennych warunków strzelania na charakter ruchu pocisku oraz wykorzystanie tych praw dla potrzeb taktycznych. Aby ułatwić rozpatrzenie problemów balistyki zewnętrznej, zazwyczaj wprowadza się pewne uproszczenia, a mianowicie:

1. Powierzchnię ziemi przyjmujemy za płaszczyznę.
2. Nie uwzględnia się obrotu kuli ziemskiej dookoła swej osi.
3. Przyjmuje się stałą siłę ciężenia, niezależną od szerokości geograficznej i wysokości lotu pocisku.
4. Kierunek siły ciężenia przyjmuje się jako pionowy, niezależnie od szerokości geograficznej.

Przy strzelaniu na bardzo duże odległości niektórych uproszczeń /np. powierzchnia ziemi jest płaszczyzną, ziemia nie obraca się / nie można stosować, ze względu na konieczność uwzględnienia rzeczywistych warunków, np. przy strzelaniu pociskami balistycznymi.

Rozwiązując teoretyczne i praktyczne problemy balistyki zewnętrznej, ustala się prawa ruchu dla pocisków o różnej budowie /np. długich i krótkich/, o różnym położeniu środka ciężkości i o różnych kształtach. Poza tym

ustala się teoretycznie i praktycznie wpływ warunków meteorologicznych na ruch pocisku w powietrzu, np.: wpływ wiatru, zmiany gęstości i wilgotności powietrza /w zależności od czasu, odległości i wysokości lotu pocisku/. Nie-mniej ważną rolę odgrywa tu ustalenie wpływu zmian warunków strzelania na tzw. charakterystyki balistyczne tj. prędkość początkową pocisku, jego ciężar i kształt. Oprócz tego balistyka zewnętrzna ustala zależności między czasem lotu pocisku i czasem działania zapalników czasowych.

Praktycznie rzecz biorąc, zasadniczym zadaniem balistyki zewnętrznej jest znalezienie elementów ruchu pocisku w różnych punktach jego toru. Do takich elementów zalicza się: współrzędne geometryczne pocisku, czas jego lotu, prędkość w danym punkcie, nachylenie toru itp. Te elementy zamieszcza się w tabelach, zwanych tabelami balistycznymi. Tabele balistyczne zestawia się dla pewnych określonych warunków, które nazywamy normalnymi lub tabelarnymi. Dla uwzględnienia odchyłek warunków strzelania od normalnych sporządza się tabele poprawek lub ustala się współczynniki wyrażające zależność między poprawkami i odchyłkami.

Osiągnięcia współczesnej nauki w zakresie pirotechniki, metalurgii i budowy maszyn dają nowe realne możliwości dalszego unowocześnienia artylerii, tak lufowej jak i raketowej. W związku z tym, przy obliczaniu torów pocisków trzeba stale doskonalić metody obliczania torów, uwzględniania warunków strzelania i sporządzania tabel.

Urzeczywistnienie zadań balistyki zewnętrznej jest możliwe jedynie przy szerokim stosowaniu eksperymentalnych badań. Dlatego też rozwoju balistyki zewnętrznej nie możemy rozpatrywać w oderwaniu od prac poligonowych, rozwoju przyrządów pomiarowych i metod przeprowadzania doświadczeń, wykorzystania fotografii, elektroniki, elektro i radio-techniki. Ułatwia to nam eksperymentalne poznanie zagadnień balistyki zewnętrznej, które stanowi następnie podstawę do badań teoretycznych.

Balistyka zewnętrzna jest jednym z głównych przedmiotów szkolenia w artylerii. Daje ona zasadniczy materiał dla rozwiązania zagadnień strzelania i praktycznego wykorzystania artylerii. Stanowi podstawę dla opracowania zasad strzelania, konstrukcji przeliczników do kierowania ogniem, celowników, a w połączeniu z balistyką wewnętrzną dostarcza podstawowych danych do projektowania nowych wzorów dział.

8. Elementy toru pocisku

Przystępując do właściwych rozważań dotyczących sposobów obliczania toru, musimy na wstępie poznać pewne oznaczenia i główne pojęcia, których będziemy używać przy określaniu zasadniczych elementów toru. Jak wspomniano w poprzednim ustępie, przy rozpatrywaniu głównego problemu przyjmowane są pewne założenia uproszczające, a mianowicie:

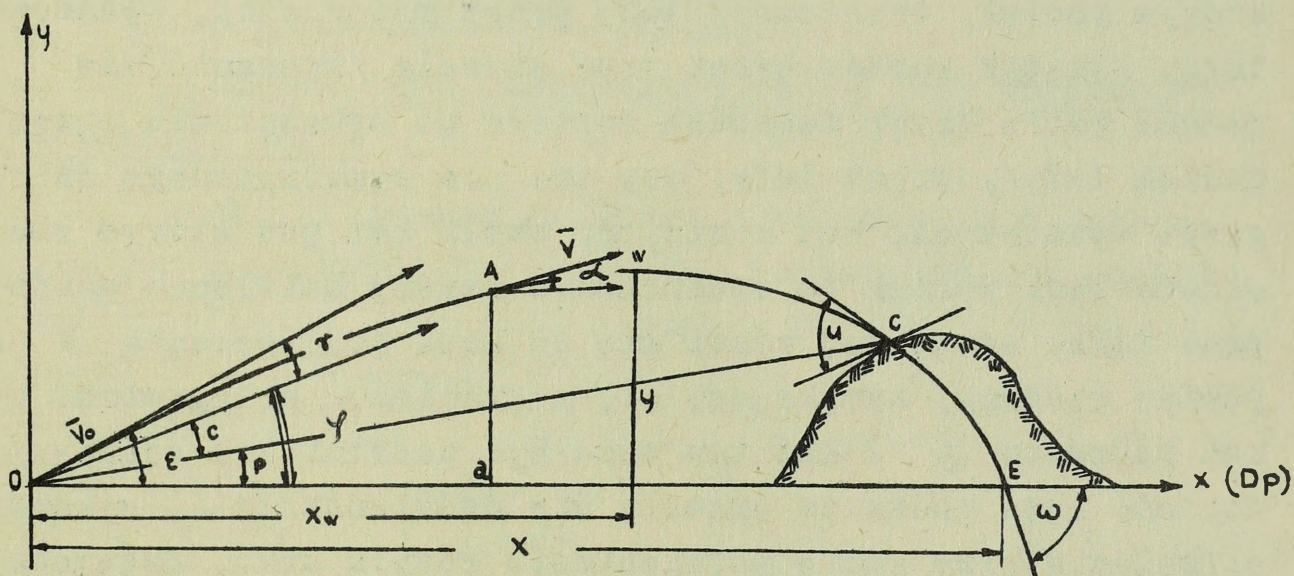
1. Pocisk - jako punkt materialny.
2. Siła oporu powietrza w każdym momencie lotu pocisku - skierowana wzdłuż stycznej do toru.
3. Tor pocisku traktujemy jako krzywą płaską.
4. Kulistości ziemi nie uwzględnia się.
5. Nie uwzględnia się zmiany przyspieszenia ziemskiego przy zmianie wysokości.

Pocisk w czasie lotu zakreśla pewną krzywą w przestrzeni. Krzywą tę nazywamy krzywą balistyczną lub torem pocisku. W zależności od warunków lotu pocisku krzywa przyjmie pewien określony kształt. Przy wspomnianych wyżej uproszczeniach, w próżni jest ona parabolą. Przy locie pocisku w powietrzu tor tworzy dwie części, z których jedna - od punktu początkowego do wierzchołka - stanowi część wznoszącą się, druga - od punktu wierzchołkowego do punktu upadku - część opadającą. Każda z tych części przypomina pewien łuk paraboli lub hyperboli, tak iż cały tor w powietrzu daje się dosyć ściśle zastąpić dwiema krzywymi stożkowymi.

Płaszczyznę, w której leży tor pocisku /traktowaną jako krzywą płaską/ nazywamy płaszczyzną strzału /rys.14/

Ruch pocisku rozpatrujemy w układzie współrzędnych prostokątnych $/x, y/$. Środek tego układu O pokrywa się ze środkiem wylotu lufy i nazywa się punktem wylotu. Płaszczyzna pozioma przechodząca przez punkt wylotu nazywa się poziomem wylotu $/działa/$.

Punkt przecięcia się toru pocisku z poziomem wylotu E $/osią odciętych $D_p/$$ nazywamy punktem upadku. Wielkość odciętej X odpowiadająca punktowi E stanowi donośność danego toru.



Rys. 14. Czynniki toru.

Wierzchołkiem toru nazywamy najwyższy punkt toru $/W/$, czyli punkt, w którym tor pocisku osiąga swe maksimum. Rzędną wierzchołka nazywamy wierzchołkową toru i oznaczamy symbolem Y , odcięta zaś tego punktu - symbolem x_w .

Punkt uderzenia U nie zawsze leży na osi odciętych, wobec czego niezbędne jest wprowadzenie pewnych oznaczeń, określających dodatkowo jego położenie.

Linia położenia celu - jest to prosta łącząca punkt wylotu z punktem celu $/O C/$. Kąt nachylenia linii położenia celu nazywamy kątem położenia celu $/p/$. Kąt położenia jest dodatni, gdy cel znajduje się powyżej i ujemny - gdy cel leży poniżej poziomu wylotu.

Przy strzelaniu rozpryskowym nie ma punktów uderzenia, a są punkty rozprysków $/R/$.

Kąt w płaszczyźnie pionowej, zawarty między linią położenia celu a linią strzału /przedłużeniem osi przewodu lufy po wycelowaniu działa w cel/ nazywamy kątem celownika / α /. Suma kąta położenia i kąta celownika daje tzw. kąt podniesienia:

$$f = p + \alpha$$

to jest kąt zawarty między linią strzału a linią poziomu wylotu.

Kąt podniesienia nie jest jednak tym kątem, pod którym pocisk, traktowany jako punkt materialny, opuszcza lufę. Wskutek ruchów broni przy strzale /znaczniejsze jednak ruchy broni zachodzą dopiero po opuszczeniu przez pocisk lufy/, drgań lufy, czy też nie symetrycznego działania gazów wylotowych, kąt rzutu, δ , czyli kąt pod którym rzeczywiście leci pocisk po opuszczeniu strefy działania gazów poza lufą, zazwyczaj różni się od kąta podniesienia α o pewien nieduży, zamykający się w granicach kilku minut kąt - kąt podrzutu γ . Kąt ten może być dodatni lub ujemny /rys.14/. Wartość kąta podrzutu określa się doświadczalnie, wykonując strzelania przy kącie podniesienia równym zeru. Zazwyczaj przyjmuje się, że wielkość kąta podrzutu nie zależy od kąta podniesienia. W rzeczywistości kąt podrzutu jest zależny od kąta podniesienia i największą wartość osiąga przy kącie podniesienia równym zeru. Kąt nachylenia stycznej tj. kąt zawarty między poziomem działa a styczną do toru w danym punkcie oznaczamy symbolem ω . Kąty te będą dodatnie na wznoszącej się części toru i ujemne - na części opadającej. Kąt nachylenia stycznej do toru w punkcie upadku nazywa się kątem upadku ω . Kąt uderzenia / u / jest to kąt zawarty między styczną do toru w punkcie uderzenia a styczną do powierzchni celu /terenu/.

Mówiąc o kątach, należy również wspomnieć o miarach tych kątów używanych w praktyce artyleryjskiej, gdzie obok normalnie stosowanych w matematyce /stopień, radian/ używa się ponadto tysięcznej.

Tysięczna, czyli kąt stanowiący 0,001 radiana, jest to kąt środkowy oparty na łuku równym 0,001 promienia.

Praktycznie rzecz biorąc, możemy powiedzieć, że tysięczna jest to kąt, pod którym widzimy odcinek 1 m z odległości 1 km. Zgodnie z definicją, kąt pełny

$$2\pi \approx 6283,2 \text{ tysięcznych.}$$

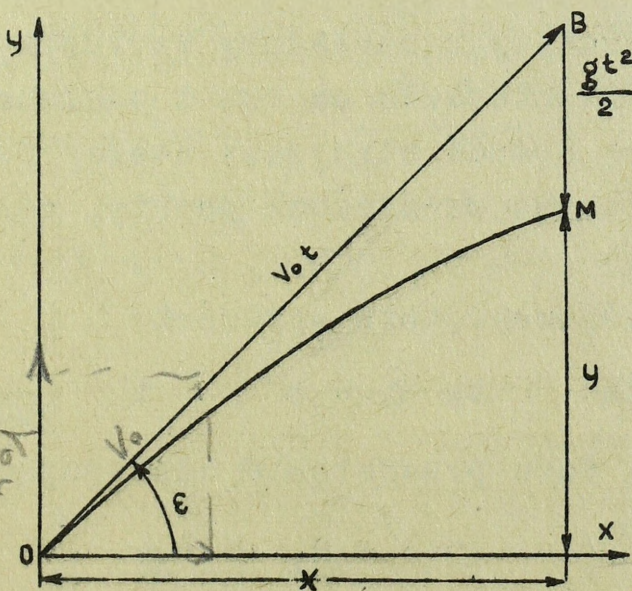
Dla dogodniejszego korzystania z tej miary kątowej w praktyce artyleryjskiej przyjmuje się tysięczną odpowiadającą kątowi środkowemu wspartemu na łuku równym $\frac{1}{6000}$ części obwodu koła.

9. Lot pocisku w próżni

Równanie toru, całkowitej odległości poziomej i wysokości toru.

Ażeby zrozumieć niektóre prawa rządzące lotem pocisku w normalnych warunkach, rozpatrzmy lot pocisku w próżni. Pocisk wyrzucony z punktu O /rys. 15/ pod kątem rzutu ξ i z prędkością początkową V_0 , zgodnie z prawem bezwładności dąży do zachowania jednostajnego i prostoliniowego lotu skierowanego wzdłuż linii rzutu.

Gdyby pocisk był nieważki, to po upływie czasu t przebyłby drogę $V_0 t$ i znalazłby się w punkcie B. Jednak w czasie lotu na pocisk działa siła ciężenia q , nadająca pociskowi przyspieszenie $g = 9,81 \text{ m/sek}^2$, w wyniku czego pocisk obniża się pionowo o wielkość $\frac{gt^2}{2}$ względem prostej OB. Po upływie czasu t pocisk opisywając łuk znajdzie się w punkcie M.



Rys.15

Współrzędne punktu M w stosunku do punktu O określamy za pomocą następujących równań, wynikających z rys.15.

$$X = v_0 \cdot t \cdot \cos \xi \quad /2/$$

i

$$y = v_0 \cdot t \cdot \sin \xi - \frac{g t^2}{2} \quad /3/$$

określamy t z równania /2/ i otrzymujemy

$$t = \frac{x}{v_0 \cdot \cos \xi} \quad /4/$$

wartość t podstawiamy do równania /3/ i otrzymujemy

$$y = \frac{v_0 x \sin \xi}{v_0 \cos \xi} - \frac{g x^2}{2 v_0^2 \cos^2 \xi}$$

Po uproszczeniu i podstawieniu $\frac{\sin \xi}{\cos \xi} = \operatorname{tg} \xi$ otrzymujemy równanie w ostatecznej postaci

$$y = x \operatorname{tg} \xi - \frac{g x^2}{2 v_0^2 \cos^2 \xi} \quad /5/$$

które jest równaniem toru. Za pomocą tego równania, zakładając pewne wartości v_0 i ξ możemy wykreślić tor lotu pocisku w próżni. Wyznaczając tor pocisku, postępujemy w następujący sposób:

1. Wkładając szereg kolejnych wartości x określamy odpowiadające im wartości y;
2. Na osi odciętych odkładamy wartości x; z wyznaczonych punktów prostopadle do osi x odkładamy kolejno wartości y i w ten sposób otrzymamy szereg punktów. Łącząc płynną krzywą wyznaczone punkty, otrzymamy szukany tor pocisku.

Dla określonego toru wartości ξ i v_0 są stałe.

Oznaczając $\operatorname{tg} \xi = a$ i $\frac{g}{2 v_0^2 \cos^2 \xi} = b$ możemy równanie toru przedstawić następująco:

$$y = a_x - b_x^2$$

Z geometrii analitycznej wiadomo, że równanie takie jest równaniem krzywej zwanej parabolą, a więc tor pocisku w próżni jest parabolą.

Przykład: Wykreślić tor pocisku w próżni przy prędkości początkowej pocisku $V_0 = 800$ m/sek i przy kącie rzutu $\xi = 45^\circ$. W obliczeniach wartości x przyjmować co 8000 m.

Rozwiązanie: 1. Przyjmując dla uproszczenia $g = 10$ m/sek² obliczamy wartości a i b

$$a = \operatorname{tg} 45^\circ = 1$$

$$b = \frac{10}{2 \cdot 800^2 \cdot \cos^2 45^\circ} = 0,00001563$$

2. Przyjmując kolejno wartości x :

$$x_1 = 0 \quad x_2 = 8000 \text{ m}; \quad x_3 = 16000 \text{ m itd.}$$

obliczamy odpowiadające im wartości y :

$$y_1 = 1 \cdot 0 - 0,00001563 \cdot 0 = 0$$

$$y_2 = 1 \cdot 8000 - 0,00001563 \cdot 8000^2 = 6999,68 \approx 7000 \text{ m}$$

$$y_3 = 1 \cdot 16000 - 0,00001563 \cdot 16000^2 = 11998,72 \approx 12000 \text{ m}$$

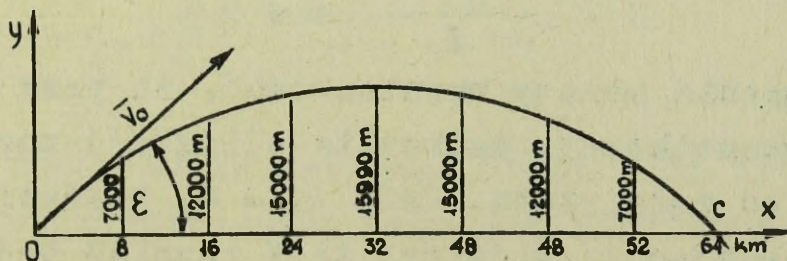
itd

3. Zaokrąglając wartości y do wielokrotnych 10, zestawiamy poniższą tabelę:

Tabela 5

x /m/	0	8000	16000	24000	32000	40000	48000	56000	64000
y /m/	0	7000	12000	15000	15990	15000	12000	7000	0

4. Na podstawie obliczonych współrzędnych x i y wyznaczamy szereg punktów i łączymy je płynną krzywą /rys. 16/



Rys.16. Wykreślanie toru według współrzędnych.

Do wyprowadzenia równania całkowitej odległości poziomej wykorzystamy równanie toru /5/.

Punkt upadku leży na poziomie wylotu, więc $y = 0$, a tym samym równanie tego punktu toru ma następującą postać

$$0 = x \operatorname{tg} \xi - \frac{g x^2}{2 v_0^2 \cos^2 \xi}$$

Wynosząc x poza nawias i przestawiając strony równania, otrzymujemy

$$x / \operatorname{tg} \xi - \frac{g x}{2 v_0^2 \cos^2 \xi} / = 0$$

To równanie będzie słuszne tylko w tym wypadku, jeżeli jeden z czynników lewej strony równania będzie równy zeru.

Dla $x = 0$ równanie będzie słuszne tylko dla punktu wylotu. Wypadek ten nas nie interesuje.

Przyjmujemy

$$\operatorname{tg} \xi - \frac{g x}{2 v_0^2 \cos^2 \xi} = 0$$

Stąd

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{g x}{2 v_0^2 \cos^2 \xi} \quad /6/$$

Wprowadzając $\operatorname{tg} \xi = \frac{\sin \xi}{\cos \xi}$ otrzymujemy

$$x = \frac{2 v_0^2 \cos^2 \xi \sin \xi}{g \cos \xi} = \frac{v_0^2 2 \cdot \cos \xi \cdot \sin \xi}{g}$$

Ponieważ $2 \sin \xi \cdot \cos \xi = \sin 2 \xi$, to po podstawieniu i oznaczeniu całkowitej odległości poziomej przez X , otrzymamy ostatecznie równanie całkowitej odległości poziomej

$$X = \frac{v_0^2}{g} \sin 2 \xi \quad /7/$$

Z równania możemy wywnioskować, że przy określonej prędkości początkowej, całkowita odległość pozioma uzależniona jest od kąta rzutu. Przy $\xi = 0$, X również będzie równe zeru. Zwiększając ξ widzimy, że X również będzie wzrastało i to do momentu uzyskania największej wartości $\sin 2 \xi$ tj.

do jedności, co będzie odpowiadało $2 \xi = 90^\circ$ czyli $\xi = 45^\circ$.
Kąt rzutu, odpowiadający maksymalnej poziomej odległości X_{\max}
oznaczamy ξ_m .

Podstawiając do wzoru /7/ wartość $\sin 2 \xi = 1$
otrzymamy wzór na maksymalną odległość poziomą

$$X_{\max} = \frac{V_0^2}{g} \quad /8/$$

Równanie wysokości toru

Rozpatrując tor pocisku w próżni stwierdziliśmy, że jest on parabolą. Stąd wynika, że wierzchołek toru dzieli go na dwie jednakowe części, a więc odcięta wierzchołka toru X_w równa jest połowie całkowitej odległości poziomej tj. $x_w = \frac{X}{2}$; podstawiamy to wyrażenie do równania /5/

$$y = \frac{x}{2} \operatorname{tg} \xi - \frac{g}{2 V_0^2 \cos^2 \xi} \left(\frac{x}{2}\right)^2$$

Po wyniesieniu $\frac{x}{2}$ poza nawias

$$y = \frac{x}{2} \left(\operatorname{tg} \xi - \frac{g}{2 V_0^2 \cos^2 \xi} \cdot \frac{x}{2} \right)$$

w nawiasie x zastępujemy wyrażeniem /7/

$$y = \frac{x}{2} \left(\operatorname{tg} \xi - \frac{g V_0^2 \sin 2 \xi}{2 V_0^2 \cos^2 \xi \cdot 2g} \right) = \frac{x}{2} \left(\operatorname{tg} \xi - \frac{\sin 2 \xi}{4 \cos^2 \xi} \right)$$

podstawiając $\sin 2 \xi = 2 \sin \xi \cdot \cos \xi$ i upraszczając

$$\begin{aligned} y &= \frac{x}{2} \left(\operatorname{tg} \xi - \frac{2 \sin \xi \cos \xi}{4 \cos^2 \xi} \right) = \frac{x}{2} \left(\operatorname{tg} \xi - \frac{1}{2} \frac{\sin \xi}{\cos \xi} \right) = \\ &= \frac{x}{2} \left(\operatorname{tg} \xi - \frac{1}{2} \operatorname{tg} \xi \right) \end{aligned}$$

Po uwolnieniu od nawiasu otrzymujemy równanie wysokości toru.

$$y = \frac{x}{4} \operatorname{tg} \xi \quad (9)$$

Jeżeli do równania /9/ zamiast x podstawimy wyrażenie /7/ to otrzymamy jeszcze jedno równanie wysokości toru.

$$y = \frac{V_0^2 \sin 2 \xi}{4g} \operatorname{tg} \xi = \frac{V_0^2 \cdot 2 \sin \xi \cos \xi}{4g} \cdot \frac{\sin \xi}{\cos \xi}$$

lub po uproszczeniu

$$y = \frac{v_0^2 \sin^2 \xi}{2g} \quad (10)$$

Na podstawie powyższego wzoru możemy łatwo wywnioskować, że przy określonej wartości prędkości początkowej pocisku, największą wysokość toru uzyskamy przy kącie rzutu $\xi = 90^\circ$, gdyż w tym przypadku $\sin^2 \xi = \sin^2 90^\circ = 1$. Stąd otrzymamy równanie największej wysokości toru.

$$Y_{\max} = \frac{v_0^2}{2g} \quad /11/$$

Porównując wyrażenia /8/ i /11/ otrzymamy

$$Y_{\max} = \frac{1}{2} \cdot X_{\max} \quad /12/$$

Jak z powyższego wynika, w próżni maksymalna wysokość strzału jest równa połowie maksymalnej odległości poziomej.

Prędkość pocisku

W momencie wylotu pocisk posiada energię kinetyczną nadaną mu przez gazy prochowe równą $\frac{m v_0^2}{2}$, gdzie m - masa pocisku.

Pocisk przebywa drogę od punktu O do M /rys.17/ W punkcie M pocisk będzie posiadał również pewną energię kinetyczną, lecz mniejszą niż w momencie wylotu, gdyż część energii została zużyta na pokonanie siły ciężenia "q" i podniesienie pocisku na wysokość y.

Masa pocisku jest wielkością stałą, więc zmniejszenie energii kinetycznej może nastąpić jedynie przez zmniejszenie prędkości pocisku.

Jeśli oznaczymy prędkość pocisku w punkcie M symbolem V, to energia kinetyczna pocisku w tym punkcie będzie równa $\frac{m v^2}{2}$

Z punktu widzenia mechaniki stwierdzamy, że praca wydatkowana na przesunięcie pocisku wzdłuż odcinka OM równa

jest różnicy energii kinetycznej pocisku na końcu i na początku drogi

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} \quad /13/$$

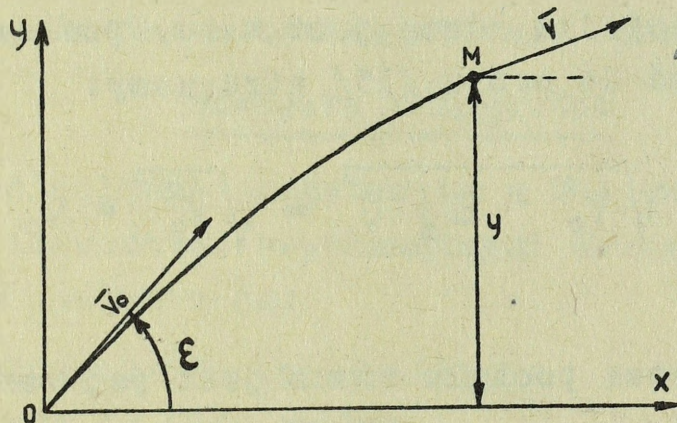
lub iloczynowi siły i przebytej drogi

$$A = - q y \quad /14/$$

gdzie: A - praca wydatkowana na dźwignięcie pocisku do punktu M.

q - siła ciężkości.

y - rzędna punktu M tj. wysokość, na którą dźwignięty został pocisk.



Rys. 17. Wektor prędkości pocisku w określonym punkcie toru.

Na podstawie /13/i /14/ układamy nowe równanie

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = - qy$$

Ponieważ $q = mg$, zatem

$$\frac{mv^2}{2} - \frac{mV_0^2}{2} = - mgy$$

$$\text{lub } mv^2 - mV_0^2 = - 2 mgy$$

Dzieląc obie strony równania przez m i obliczając V, otrzymamy równanie prędkości pocisku

$$v = \sqrt{V_0^2 - 2 gy} \quad /15/$$

Z równania wynika, że przy locie w próżni prędkość pocisku zależy od rzędnej y. Im większą rzędną y, tym mniejsza prędkość i odwrotnie.

Z powyższych rozważań wynikają następujące wnioski:

1. Na wznoszącej się części toru rzędna y zwiększa się, a prędkość pocisku maleje.
2. Największą wartość rzędna y osiąga, gdy pocisk znajdzie się w punkcie wierzchołka toru. W tym też punkcie będzie on posiadał najmniejszą prędkość.
3. Przy locie pocisku na części opadającej toru rzędna y zmniejsza się, a prędkość pocisku wzrasta.
4. Tor pocisku w próżni jest parabolą, czyli krzywą symetryczną, a więc punkty toru jednakowo oddalone od wierzchołka posiadają jednakowe rzędne y , a co za tym idzie i prędkości pocisku w tych punktach są jednakowe.
5. Rzędna punktu upadku równa jest zeru, ponieważ podstawiając jej wartość do wzoru /15/ otrzymamy:

$$V_k = \sqrt{V_0^2 - 2g \cdot 0} = \sqrt{V_0^2} = V_0$$

tj. prędkość końcowa pocisku równa jest jej wartości początkowej.

Czas lotu pocisku

Czas lotu pocisku w próżni można obliczyć ze znanego nam wzoru /4/.

$$t = \frac{x}{V_0 \cos \xi}$$

gdzie x - odcięta rozpatrywanego punktu toru pocisku.

Podstawiając do /4/ równanie całkowitej odległości poziomej /7/ otrzymamy równanie całkowitego czasu lotu pocisku

$$T = \frac{V_0^2 \sin 2\xi}{V_0 \cos \xi \cdot g} = \frac{V_0 \cdot 2 \sin \xi \cdot \cos \xi}{\cos \xi \cdot g}$$

po uproszczeniu

$$T = \frac{2 V_0 \xi}{g} \cdot \sin \xi$$

Podstawiając do równania /4/ wzór na odciętą wierzchołka toru $x_w = \frac{x}{2}$ otrzymamy czas lotu pocisku do wierzchołka toru

$$t_w = \frac{x}{2 V_0 \cos \xi} = \frac{V_0^2 \sin 2 \xi}{2 V_0 \cos \xi \cdot g} = \frac{V_0 \sin \xi \cdot \cos \xi}{\cos \xi \cdot g}$$

a po uproszczeniu

$$t_w = \frac{V_0}{g} \cdot \sin \xi \quad (17)$$

Z porównania wyrażień /16/ i /17/ wynika

$$t_w = \frac{T}{2} \quad /18/$$

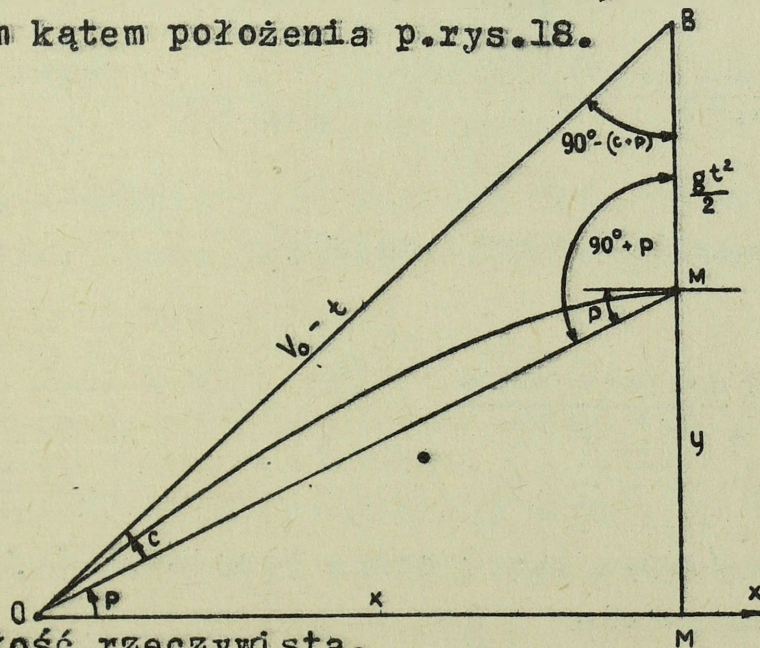
Widzimy, że w próżni czas lotu pocisku do wierzchołka toru jest równy połowie całkowitego czasu lotu pocisku.

Równanie odległości

Równanie odległości rozpatrzmy w biegunowym układzie współrzędnych. Biegunowymi współrzędnymi danego punktu toru w płaszczyźnie strzelania są:

- p - kąt położenia danego punktu;
- D - odległość do tego punktu.

Wyprowadźmy równanie odległości punktu M, leżącego na torze pod określonym kątem położenia p. rys.18.



Rys.18. Odległość rzeczywista.

Stosując twierdzenie sinusów do trójkąta OBM, otrzymujemy następujące równanie

$$\frac{gt^2}{2} : V_0 t = \frac{\sin c}{\sin(90^\circ + p)} = \frac{\sin c}{\cos p}$$

Stąd

$$\frac{gt^2}{2} = \frac{V_0 t \sin c}{\cos p}$$

/19/

po podzieleniu obu stron równania /19/ przez t

$$\frac{gt}{2} = \frac{V_0 \sin c}{\cos p}$$

/20/

skąd

$$t = \frac{2 V_0 \sin c}{g \cos p}$$

/21/

Z trójkąta OBM ponadto wynika, że

$$\frac{D}{V_0 t} = \frac{\sin [90^\circ - (c+p)]}{\sin(90^\circ + p)} = \frac{\cos(c+p)}{\cos p}$$

skąd

/22/

$$D = \frac{V_0 t \cos(c+p)}{\cos p}$$

Podstawiając wartość t otrzymujemy

$$D = \frac{V_0^2 2 \cos(c+p) \sin c}{g \cos^2 p}$$

/23/

Wartość $2 \cos(c+p) \cdot \sin c$ można przedstawić jako różnicę sinusów, a mianowicie

$2 \sin c \cdot \cos(c+p) = \sin(2c+p) - \sin p$. Stosując odpowiednią zamianę w równaniu /23/ otrzymamy ostatecznie

$$D = \frac{V_0^2}{g} \cdot \frac{\sin(2c+p) - \sin p}{\cos^2 p}$$

/24/

Wykorzystując równanie odległości, możemy określić odległość do dowolnego punktu na torze, jeżeli znany jest nam kąt położenia danego punktu.

Rozpatrując równanie /24/ widzimy, że przy określonych wartościach prędkości początkowej V_0 i kąta położenia p , największą odległość otrzymujemy przy $\sin /2\alpha + p/ = 1$ tj. gdy $2\alpha + p = 90^\circ$. Stąd otrzymamy wartość kąta celownika C_m , odpowiadającą maksymalnej odległości przy danym kącie położenia p .

$$C_m = \frac{90^\circ - p}{2} \quad /25/$$

Ażeby otrzymać równanie maksymalnej odległości D_{\max} , podstawmy do równania /24/, zamiast $\sin /2\alpha + p/$ jego maksymalną wartość - równą jedności.

$$D_{\max} = \frac{V_0^2}{g} \cdot \frac{1 - \sin p}{\cos^2 p}$$

ponieważ $\cos^2 p = 1 - \sin^2 p$, to

$$D_{\max} = \frac{V_0^2}{g} \cdot \frac{1 - \sin p}{1 - \sin^2 p} = \frac{V_0^2}{g} \cdot \frac{1 - \sin p}{(1 - \sin p) \cdot (1 + \sin p)}$$

po uproszczeniu

$$D_{\max} = \frac{V_0^2}{g} \cdot \frac{1}{1 + \sin p} \quad /26/$$

Podstawiając do równania /26/ wartość kąta położenia $p = 0$, otrzymujemy znane już nam równanie /8/

$$D_{\max} = \frac{V_0^2}{g} = X_{\max} \quad /27/$$

Podstawiając wartość kąta położenia $p = 90^\circ$, otrzymamy równanie odległości dla pionowego strzału: patrz równanie /11/

$$D_{90^\circ} = \frac{V_0^2}{g} \cdot \frac{1}{1 + \sin 90^\circ} = \frac{V_0^2}{g} \cdot \frac{1}{2}$$

czyli

$$D_{90^\circ} = \frac{V_0^2}{2g} = Y_{\max}$$

Z porównania wyrażeń /8/, /26/, /11/ i /27/ wynika, że

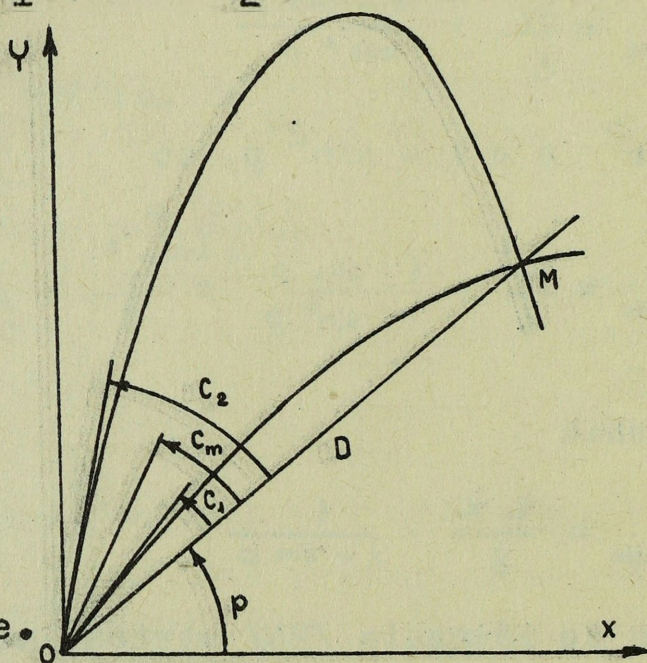
$$D_{90^\circ} = \frac{1}{2} D_{o_{max}} \quad /29/$$

tzn. - w próżni odległość pionowego strzału jest o połowę mniejsza od maksymalnej odległości poziomej.

Tory sprzężone

Stwierdziliśmy uprzednio, że odległość maksymalną otrzymujemy przy kącie celownika $C_m = \frac{90^\circ - p}{2}$

Odchyłka wartości celownika od wartości C_m w większą lub w mniejszą stronę w konsekwencji doprowadza do zmniejszenia odległości. Z powyższego wynika, że dla każdej odległości mniejszej od D_{max} , istnieją dwa tory, które otrzymamy przy kątach celownika $C_1 < C_m$ i $C_2 > C_m$ /rys. 19/



Rys. 19. Tory sprzężone.

Te dwa tory, otrzymane przy różnych nastawach kąta celownika, które dają jednakową odległość strzału, nazywamy torami sprzężonymi, przy czym ten z nich, który otrzymano przy kącie celownika mniejszym od C_m nazywa się torem płaskim, a ten który otrzymano przy kącie celownika większym od C_m - torem stromym.

Pojęcia o płaskim i stromym torze należy wiązać wyłącznie z pojęciem torów sprzężonych. Na przykład przy strzelaniu do czołgów z armat, a nawet haubic przy pełnym ładunku wykorzystuje się początkowe płaskie odcinki toru. Natomiast przy strzelaniu na dużych odległościach z armat lub przy strzelaniu do ukrytych celów z haubic, wykorzystuje

się cały tor; w tym wypadku ma on kształt stromy.

Z równania /20/ wnioskujemy, że przy stałych wartościach V_0 i p czas lotu pocisku jest wprost proporcjonalny do sinusa kąta celownika. W związku z tym czas lotu pocisku jest mniejszy przy płaskim torze, niż przy stromym. Przy strzelaniach artylerii przeciwlotniczej, czas lotu pocisku jest jednym z głównych czynników, określających skuteczność strzelania; im mniejszy czas lotu, tym skuteczniejsze strzelanie. Dlatego też w artylerii przeciwlotniczej wykorzystujemy wyłącznie płaskie tory, przy których oprócz mniejszych czasów lotu pocisków występują i inne dodatnie cechy, jak:

- znacznie mniejsze przewyższenie toru nad linią celu;
- kąt celownika i czas lotu zmieniają się w tę samą stronę, co odległość tj. przy zwiększaniu /zmniejszaniu/ odległości zwiększa /zmniejsza/ się t i c. Przy stromych torach ta zależność jest odwrotna.

Zależność kąta celownika od kąta położenia celu

Jeżeli pocisk wystrzelono w próżni z prędkością początkową V_0 , to po upływie czasu t przebędzie on odległość osiową $L = V_0 t$ i obniży się w stosunku do linii rzutu o wartość $h = \frac{gt^2}{2}$.

Na podstawie powyższego wnioskujemy, że przy danej prędkości początkowej odległość osiowa, jak i również obniżenie pocisku zależą wyłącznie od czasu lotu pocisku. Tak więc jeżeli oddamy szereg strzałów przy jednakowej prędkości początkowej, lecz pod różnymi kątami rzutu, to w jednakowym odstępie czasu t pociski przebędą jednakowe odległości osiowe i wartości obniżeń będą również jednakowe /rys. 20/. Zjawisko to nazywamy "prawem obniżeń", które brzmi następująco: przy strzelaniu w próżni przy różnych torach pocisku, odpowiadających tej samej prędkości początkowej, równym czasem lotu pocisku odpowiadają równe obniżenia i równe odległości osiowe.

Opierając się na powyższym prawie, można ustalić zależność pomiędzy kątem celownika α i kątem położenia p przy stałym czasie lotu pocisku / $t = \text{const.}$ rys. 20/

Niech punktowi C leżącemu na poziomie działa i punktowi M_1 leżącemu pod kątem położenia p_1 odpowiadają jednakowe czasy lotu pocisku i oo za tym idzie, jednakowe odległości osiowe $L_0 = L_1$ i jednakowe obniżenia $h_0 = h_1$

Rozpatrując trójkąt prostokątny ON_0C otrzymamy

$$h_0 = L_0 \cdot \sin c_0 \quad /30/$$

a z trójkąta ON_1M_1 obliczamy

$$\frac{h_1}{L_1} = \frac{\sin c_1}{\sin 90^\circ + p_1} = \frac{\sin c_1}{\cos p_1}$$

Stąd

$$h_1 = \frac{L_1 \cdot \sin c_1}{\cos p_1} \quad /31/$$

Ponieważ $h_0 = h_1 \overset{L_0}{=} L_1$, łącząc prawe strony równań /30/ i /31/ znakiem równania i dzieląc je przez $L_0 = L_1$ otrzymamy

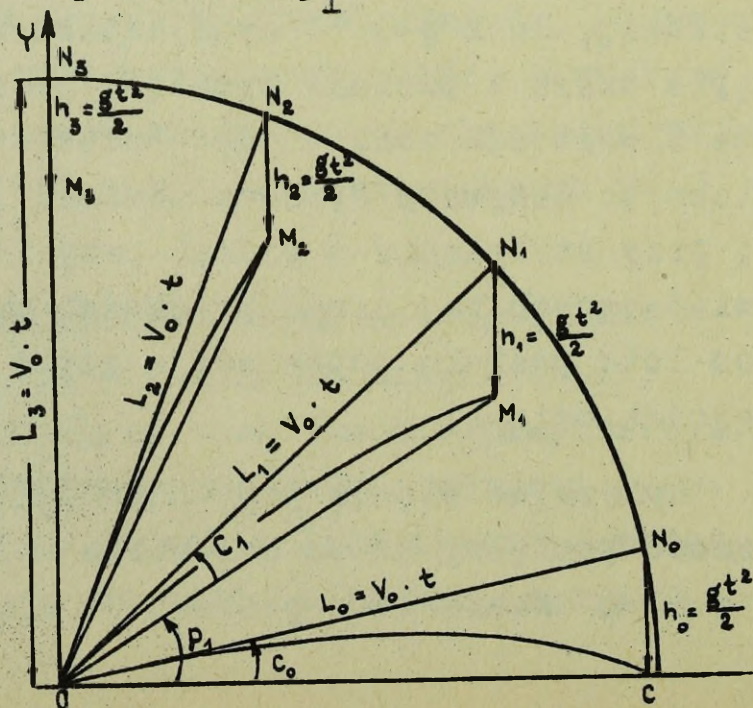
$$\sin c_0 = \frac{\sin c_1}{\cos p_1} \quad /32/$$

stąd

$$\sin c_1 = \sin c_0 \cdot \cos p_1 \quad /32/$$

gdzie c_0 - kąt celownika przy strzelaniu do celu na poziomie wylotu,

c_1 - kąt celownika przy strzelaniu do celu znajdującego się pod kątem położenia p_1 .



Rys. 20. Prawo obniżień.

Z równania, które otrzymaliśmy wynika, że dla punktów którym odpowiadają jednakowe czasy lotu pocisku, przy zwiększaniu kąta położenia, kąt celownika zmniejsza się i przy $p = 90^\circ$ równy jest zeru.

W tych przypadkach, gdy C_0 nie przekracza 9° /1-50/, do wzoru /32/ możemy zamiast sinusów kątów C_1 i C_0 podstawiać wartości kątów wyrażonych w tysięcznych w postaci ułamka dziesiętnego, na przykład kąt $9^\circ = 1-50$ zapisujemy w postaci 0,150, czyli

$$c = c_0 \cdot \cos p \quad /33/$$

Powyższy wzór, jak wykazały doświadczenia jest słuszny nie tylko przy strzelaniu w próżni, lecz również i przy strzelaniach w powietrzu, ponieważ kąty celownika obliczone przy pomocy tego wzoru są zbliżone do rzeczywistych. W wyniku tego równanie /33/ znalazło zastosowanie w teoretycznych podstawach budowy automatycznych celowników małokalibrowej artylerii przeciwlotniczej.

10. Lot pocisku w powietrzu

Wiadomości z aerodynamiki

Aerodynamika jest to nauka zajmująca się badaniem sił działających na przedmiot poruszający się w powietrzu.

W powietrzu, oprócz siły ciężkości q , na lot pocisku wpływa jeszcze siła oporu powietrza R , zwana również oporem aerodynamicznym.

Przy współczesnych prędkościach lotu pocisku, siła oporu powietrza jest kilkakrotnie większa od siły ciężkości. Do przyczyn powstawania oporu aerodynamicznego zaliczamy:

- spoistość atmosfery /tarcie wewnętrzne/;
- bezwładność tych cząsteczek powietrza, które zmieniają swoje położenie, opływając lecący pocisk.

Spoistością powietrza nazywamy zdolność jego do okazywania oporu w przesuwanie się jednej warstwy w stosunku do drugiej. Niech dwie warstwy powietrza, leżące obok siebie, poruszają się równoległe, lecz z różnymi prędkościami. W wyniku ruchu molekularnego, cząsteczki z jednej

warstwy przenikają do drugiej. Rezultatem tego zjawiska jest to, że cząsteczki warstwy posiadającej prędkość większą, starają się przyspieszyć ruch warstwy posiadającej mniejszą prędkość i odwrotnie.

Spoistość zależy od temperatury powietrza. Przy zwiększeniu temperatury prędkość ruchu nuklearnego wzrasta, w wyniku czego wzrastają również siły spoistości.

Bezwładnością nazywamy właściwość ciał do zachowywania stanu spoczynku lub jednostajnego ruchu. Siła bezwładności zależy od masy przedmiotu: im większa masa, tym większa siła bezwładności i odwrotnie.

Pod działaniem sił spoistości powietrza i bezwładności jego cząsteczek, lotowi pocisku w atmosferze towarzyszą następujące zjawiska:

1. Pocisk poruszający się z dużą prędkością rozpycha na boki cząsteczki powietrza napotkane na swej drodze. Zgodnie z prawem bezwładności cząsteczki starają się zachować początkowe położenie i opływają pocisk. Ściskanie cząsteczki powietrza, pod wpływem sił przeciwdziałania molekularnego, jak gdyby przylepiają się do powierzchni pocisku, tworząc cienką zagęszczoną warstwę, tak zwaną warstwą graniczną. Warstwa graniczna zostaje pociągnięta za pociskiem, lecz pod działaniem siły spoistości warstw obok leżących traci na prędkości i zesliuguje się z powierzchni pocisku w stronę przeciwną do jego ruchu.

Powstałe przy tym siły tarcia są pierwszym z elementów ogólnego aerodynamicznego oporu powietrza.

Wielkość siły tarcia zależy od prędkości pocisku i od chropowatości jego powierzchni.

Przy niewielkich prędkościach pocisku warstwy powietrza opływają pocisk, nie tworząc zawichrzeń. Taki opływ powietrza nazywany warstwowym, charakteryzuje się on niewielką siłą tarcia. Natomiast przy dużych prędkościach pocisku, powstają zawichrzenia, tzw. ruch turbulentny, cząsteczek powietrza /od łacińskiego - turbulentus - chaotyczny/.

Przy turbolentnym opływie zachodzi przemieszanie się warstw powietrza w wyniku czego zwiększa się siła tarcia o pocisk. Cząstki powietrza opływając nierówności na powierzchni pocisku tworzą dodatkowe zawichrzenia, co zwiększa jeszcze siłę tarcia.

Doświadczenia wskazują, że siła tarcia wzrasta 2-3 razy przy szorstkiej powierzchni pocisków. Wygładzając powierzchnie pocisku, na przykład przez pomalowanie, otrzymujemy zwiększenie odległości strzelania o 0,5 - 2,5%.

2. Przy opływaniu przedmiotu o łagodnie zmieniającym się przekroju, prądy powietrza w miarę zwiększania się przekroju stopniowo zbliżają się do siebie, a w miarę jego zmniejszania - rozchodzą się. Tam gdzie prądy powietrza zbliżają się, prędkość przepływu potoku wzrasta i ciśnienie na przedmiot zmniejsza się i na odwrót, gdzie prądy powietrzne rozchodzą się, prędkość przepływu potoku zmniejsza się, a tym samym ciśnienie wzrasta. To zjawisko zachodzi również przy locie pocisku.

Przy wierzchołku pocisku prędkość ześlizgiwania się warstwy granicznej jest najmniejsza i ciśnienie największe. W miarę zwiększania się przekroju pocisku prędkość ześlizgiwania się warstwy granicznej wzrasta i ciśnienie opada. Przy największym przekroju prędkość ześlizgu osiąga swą największą, a ciśnienie - najmniejszą wartość. Jeżeli część dna pocisku ma kształt ściętego stożka, to po przekroczeniu maksymalnego przekroju, prędkość ześlizgu warstwy granicznej zaczyna zmniejszać się i ciśnienie zwiększa się.

Przy dnie pocisku następuje oderwanie się warstwy granicznej i tworzą się zawichrzenia. Prędkość potoku powietrznego gwałtownie wzrasta i w rezultacie za dnem pocisku powstaje strefa podciśnienia. Różnica ciśnień na głowicową i debną część pocisku stwarza dodatkowy opór. Opór ten nazywamy oporem debnym. Jest to drugi zasadniczy element ogólnego oporu aerodynamicznego.

3. Pocisk poruszając się z dużą prędkością, napotykając na swojej drodze cząsteczki powietrza, stara się je rozepchnąć na boki. Wskutek bezwładności cząsteczek powietrza, znaczna ich ilość jednak nie zostaje usunięta z drogi pocisku i pocisk popycha je przed sobą, ściskając z wielką siłą. W ten sposób przy głowicowej części pocisku tworzy się silne zagęszczenie powietrza, przemieszczające się razem z pociskiem. Wielkość tego zagęszczenia zależy od kalibru pocisku, jego prędkości i kształtu części głowicowej.

Ścisnięte cząsteczki powietrza, dzięki swej prężności^{x/} naciskają na sąsiednie cząsteczki, napotykając zarazem na przeciwdziałanie z ich strony. Przy prędkościach ruchu większych od 250 m/sek u wierzchołka pocisku wytwarza się zmienne zagęszczenie powietrza, które na przemian to zmniejsza się, to zwiększa. Ta zmiana zagęszczenia wywołuje wahadkowe ruchy cząsteczek powietrza rozchodzące się w kształcie sferycznych fal. Prędkość rozchodzenia się tych fal jest równa prędkości dźwięku i zależy od prężności powietrza, która z kolei pozostaje w wprost proporcjonalnej zależności do temperatury powietrza. Tabele strzelnicze zestawione są dla prędkości dźwięku równej 340,9 m/sek co odpowiada temperaturze powietrza + 15°C i jego względnej wilgotności - równej 50%.

Największe zagęszczenie fali dźwiękowej odpowiada punktowi, w którym ona powstaje /wierzchołek pocisku/, w miarę oddalania się od tego punktu powierzchnia strefy zwiększa się, w rezultacie czego gęstość fali maleje.

Tworząc fale dźwiękowe i pokonując powstające przy tym zagęszczenie powietrza, pocisk stopniowo wytraca swą energię kinetyczną. Ten stopniowy spadek energii kinetycznej pocisku wyraża się w zmniejszeniu się jego prędkości. W ten sposób powstaje nowy opór - opór fali.

x/ Prężnością nazywamy zdolność ciała do przeciwstawiania się ścisnieniu, jak również powrotu do pierwotnego kształtu lub objętości, gdy zewnętrzne siły przestaną na nie oddziaływać.

Opór fali jest trzecim elementem ogólnego oporu aerodynamicznego. Dla pocisku określonego kalibru i kształtu, siła oporu fal zależy od wzajemnego położenia pocisku i fal przez niego wytwarzanych. Pocisk i fala dźwiękowa są w ciągłym ruchu, a więc ich wzajemna zależność wyraża się stosunkiem prędkości $\frac{V}{a}$, gdzie V - prędkość pocisku i a - prędkość rozchodzenia się dźwięku.

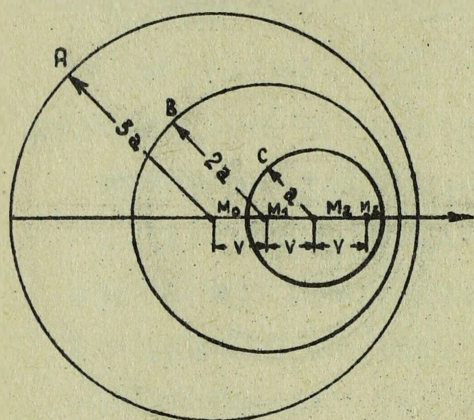
Ażeby przedstawić schematycznie wzajemny układ pocisku i fali dźwiękowej rozpatrzmy odcinek toru, który przebywa pocisk w określonym czasie np. 3 sek. /rys. 21, 22 i 23/. Jeżeli punkt M_0 przyjmiemy jako punkt początkowy, to pocisk poruszający się z prędkością V po upływie 1 sek. znajdzie się w punkcie M_1 , po upływie drugiej sekundy w punkcie M_2 i po upływie trzeciej sekundy - w punkcie M_3 . Gdy pocisk osiągnie punkt M_3 , to fala dźwiękowa wywołana w punkcie M_0 rozprzestrzeni się na wszystkie strony i przyjmie kształt kuli o promieniu $M_0 A = 3a$, w punkcie M_1 - o promieniu $M_1 B = 2a$ i w punkcie M_2 - o promieniu $M_2 C = a$. W punkcie M_3 fala zaczyna się dopiero tworzyć.

W wypadku gdy prędkość pocisku jest większa niż 250 m/sek, lecz mniejsza od prędkości dźwięku $\frac{V}{a} < 1$, fale dźwiękowe wyprzedzają pocisk i porusza się on wewnątrz tworzonych przez siebie fal. W kierunku ruchu pocisku fale są zbliżone jedna do drugiej i to zbliżenie jest tym większe, im mniejsza jest różnica między prędkością pocisku i dźwięku /rys. 21/. Otrzymujemy wtedy słabe fale ze względu na małe prędkości pocisku, dlatego też opór fali w tym wypadku ma nieznaczną wartość.

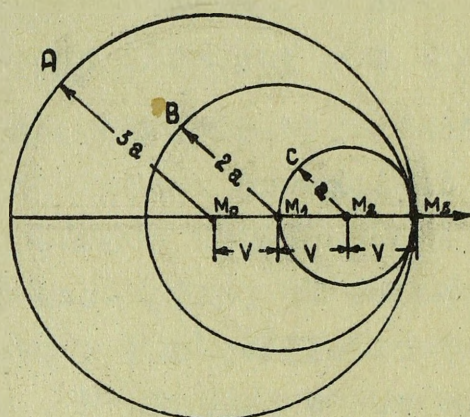
W wypadku gdy prędkość pocisku równa jest prędkości dźwięku $\frac{V}{a} = 1$, pocisk cały czas porusza się u wierzchołka tworzonej przez siebie fali /rys. 22/. Ze względu na to, że fale kształtują się w sposób ciągły i wierzchołki ich nakładają się jeden na drugi, u wierzchołka pocisku powstaje silne zagęszczenie powietrza. W wyniku tego opór fali gwałtownie wzrasta.

Rozpatrzmy teraz wypadek, gdy pocisk posiada prędkość większą od prędkości dźwięku $\frac{V}{a} > 1$.

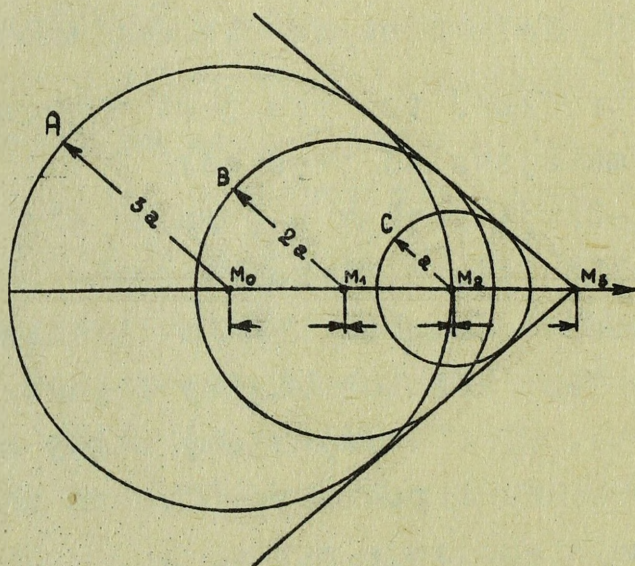
Pociąg w tym wypadku wyprzedza tworzone przez siebie fale, wydłużając strefę zagęszczenia w kształt stożka /rys. 23/. Zagęszczenie powtarza na powierzchni stożka tworzy tzw. falę głowicową lub balistyczną.



Rys. 21



Rys. 22

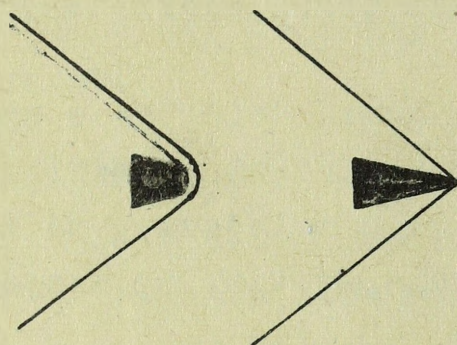


Rys. 23

Doświadczenia wykazują, że po utworzeniu się fali balistycznej, dalsze zwiększanie prędkości pocisku prowadzi do zmniejszenia oporu fali. To zjawisko tłumaczy się tym, że przy zwiększeniu prędkości pocisku, wydłużenie zagęszczenia zachodzi szybciej /stożek staje się bardziej ostry/, w wyniku czego gęstość fali balistycznej zmniejsza się.

Silka oporu fali w znacznym stopniu zależy od kształtu głowicowej części pocisku. Z rys. 24 widzimy, że

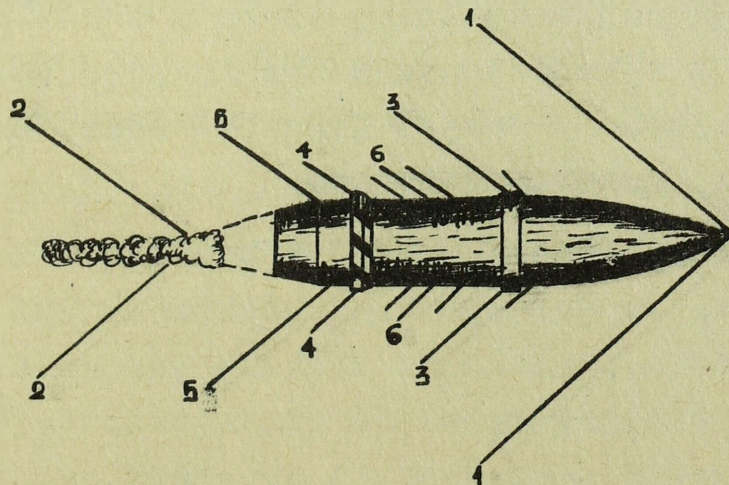
powierzchnia na którą naciska fala głowicowa, jest znacznie mniejsza u pocisków o ostro zakończonych głowicy niż u głowicy z tępym zakończeniem. Oprócz tego, w pierwszym przypadku fala jest osadzona na zaostrenym końcu, a w drugim wypadku między pociskiem i falą tworzy się cienka warstwa silnie zagęszczonego powietrza. Dlatego też opór fali balistycznej, przy pociskach o głowicach o ostro zakończonych jest znacznie mniejszy niż u pocisków z tępymi głowicami.



Rys. 24. Kształtowanie się fali głowicowej u pocisków o różnych kształtach głowicy.

Nie tylko wierzchołek pocisku wpływa na pojawienie się fali: źródłem pojawienia się jej są również wszelkiego rodzaju nierówności i występy na powierzchni pocisku, na przykład pierścienie centrające, pierścienie wiodące itd.

Rozpatrzmy z kolei rysunek 25.



Rys. 25. Obraz zaburzeń spowodowanych przez pocisk poruszający się z prędkością większą od prędkości dźwięku.

Przednia część pocisku wywołuje falę balistyczną czołową /1/, następnie powstaje szereg drobnych fal balistycznych, spowodowanych przez nierówności powierzchni pocisku /2/, za którymi dopiero posuwa się fala /3/, pochodząca od pierścieni wiodących.

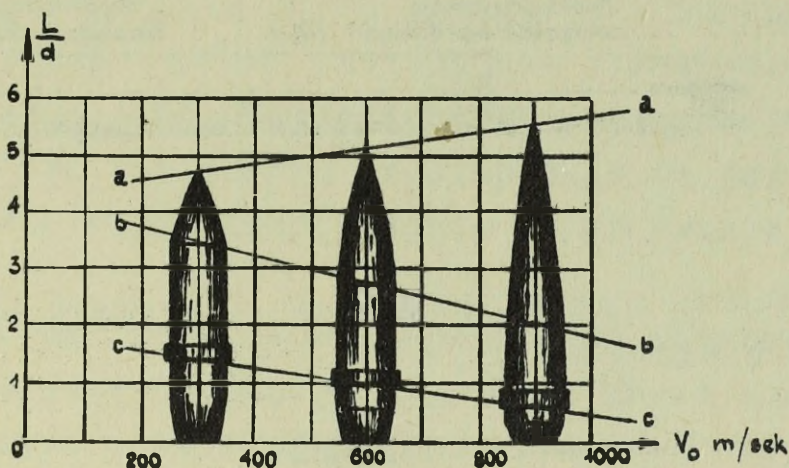
Poza dnem widoczny jest stożkowy obszar niskiego ciśnienia /4/. Zaburzenia na części dennej są z kolei źródłem nowych fal balistycznych, a więc tzw. fali ogonowej /5/, poprzedzanej szeregiem drobnych fal /6/, wychodzących z części dennej oraz całego szeregu równomiernie za nią rozmieszczonych fal /8/ wywołanych przez oddzielające się okresowo wiry.

Reasumując możemy stwierdzić, że w ogólnym bilansie sił całkowitego oporu zasadniczymi elementami są:

- a/ przy prędkościach pocisku mniejszych od 250 m/sek - opór denny i opór tarcia, z tym, że decydującą rolę odgrywa opór denny;
- b/ przy prędkościach pocisku większych od 250 m/sek - opór fali /nazywany też oporem na ostrożuku/, opór denny i opór tarcia.

Znajomość praw aerodynamiki daje nam możliwość doboru takiego kształtu pocisku, dla którego opór powietrza byłby najmniejszy. Rozpatrując wpływ poszczególnych elementów pocisku na całkowitą wielkość oporu powietrza dochodzimy do wniosku, że nie ma jakiegoś jednego, najbardziej z punktu widzenia widzenia aerodynamicznego korzystnego kształtu pocisku, że pocisk o pewnych ustalonych kształtach pracuje najkorzystniej tylko w określonych warunkach, tylko w ograniczonym zakresie prędkości. Dlatego też każdorazowo kształt jego powinien być do tych warunków jak najstaranniej dobrany.

Na rys. 26 podano różne kształty pocisku w zależności od zakresu prędkości, do jakiego dany pocisk ma być dostosowany. Z wykresu widzimy, że im na większą prędkość obliczony jest pocisk, tym dłuższą ma część głowicową. Wydłużenie to uzyskuje się przez zmniejszenie długości części cylindrycznej, lub części pocisku za pierścieniem wiodącym, albo też przez zwiększenie całkowitej długości pocisku.



Rys. 26. Najkorzystniejsze kształty pocisków w zależności od prędkości.

Siła oporu powietrza

Teoretyczne badanie oporu powietrza jest zadaniem bardzo trudnym ze względu na dużą złożoność zjawisk zachodzących w czasie lotu pocisku w powietrzu. Dlatego nie ma do chwili obecnej ani jednej teorii traktującej o oporze powietrza, która by umożliwiła pełne obliczenie siły oporu powietrza bez wykonania praktycznych doświadczeń.

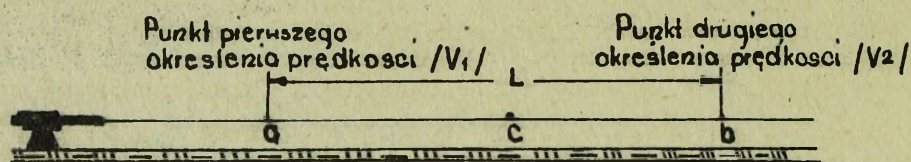
Badanie siły oporu powietrza w zasadzie odbywa się trzema sposobami:

- dynamicznym /przez strzelanie/,
- statycznym /przez badanie w tunelu aerodynamicznym/,
- optycznym /przez fotografowanie/.

Sposób dynamiczny polega na tym, że praca siły oporu powietrza b w stosunku do pocisku wyraża się jego hamowaniem, w rezultacie czego pocisk traci prędkość, a tym samym i energię kinetyczną.

Rozpatrując niewielki odcinek toru /rys. 27/, pracę siły oporu powietrza A_R na tym odcinku, można przedstawić jako iloczyn siły R i długości odcinka L tj.

$$A_R = R L$$



Rys. 27.

lub jako różnicę energii kinetycznej pocisku na końcu i na początku odcinka ab tj.

$$A_R = \frac{mV_b^2}{2} - \frac{mV_a^2}{2} \quad /35/$$

gdzie m - masa pocisku

V_b i V_a - prędkość pocisku w punktach b i a.

Na podstawie wzorów /34/ i /35/ układamy równanie siły

$$R_L = \frac{mV_b^2}{2} - \frac{mV_a^2}{2} = \frac{m(V_b^2 - V_a^2)}{2}$$

skąd otrzymujemy:

$$R = \frac{m(V_b^2 - V_a^2)}{2L}$$

Masę pocisku m możemy przedstawić jako stosunek ciężaru pocisku do przyspieszenia ziemskiego, stąd:

$$R = \frac{g(V_b^2 - V_a^2)}{2gL} \quad /36/$$

Otrzymana siła oporu powietrza jest wielkością średnią dla odcinka ab, odpowiadającą punktowi c leżącemu pośrodku odcinka ab.

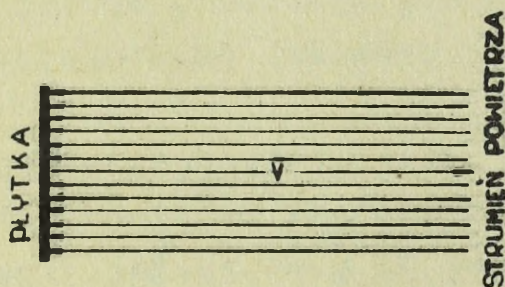
Przy statycznym sposobie określenia siły oporu powietrza, poddajemy badaniu pocisk przez działanie strumienia powietrza w tunelu aerodynamicznym. Przy pomocy specjalnej aparatury możemy badać zarówno siłę oporu powietrza, jak i poszczególne jego składowe.

Optyczny sposób badania siły oporu powietrza polega na fotografowaniu fal powlekanych i zaburzeń powstających przy locie pocisku wstępnej analizie tych zdjęć.

Aby wyrazić siłę oporu powietrza w postaci określonego wzoru przeprowadźmy następujące rozważania.

Wyobraźmy sobie okrągłą płytkę, poruszającą się w powietrzu w kierunku prostopadłym do jej powierzchni /rys. 28/ z prędkością rzędu kilku metrów na sekundę.

Pokonując bezwładność napotkanych cząsteczek powietrza, płytka będzie je popychała przed sobą, czyli będzie pokonywała opór powietrza R , którego wielkość będzie proporcjonalna do powierzchni płytki i siły napotykanego potoku powietrza $\frac{\rho v^2}{2}$, gdzie ρ - masa powietrza, v - prędkość potoku równa prędkości ruchu płytki.



Rys. 28

Dla rozpatrywanego wypadku siła oporu powietrza może być wyrażona następującym wzorem

$$R = S \frac{\rho v^2}{2} \quad /37/$$

gdzie: $\frac{\rho v^2}{2}$ nosi nazwę naporu prędkościowego powietrza.

Zmieńmy teraz kształt poruszającego się przedmiotu, czyli zastąpmy płytkę pociskiem o powierzchni przekroju równej S i przyjmijmy, że kierunek jego ruchu pokrywa się z osią pocisku. W tym wypadku cząsteczki powietrza rozsuwane głowicą pocisku, zaczynają opływać pocisk i siła oporu powietrza zmniejsza się /mniej więcej o 5 razy/. W związku z powyższym do wzoru /37/ wprowadźmy współczynnik C_x .

Otrzymamy wtedy

$$R = S \frac{\rho v^2}{2} C_x \quad /38/$$

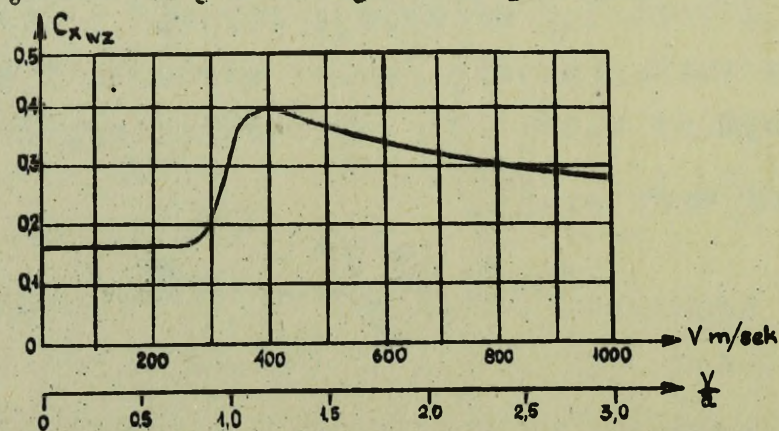
Zacznijmy stopniowo zwiększać prędkość pocisku. Przy prędkościach mniejszych niż 250 m/sek siła oporu powietrza będzie warstawała proporcjonalnie do kwadratu prędkości, a współczynnik C_x zmieniać się nie będzie.

Przy prędkościach większych od 250 m/sek zaczynają tworzyć się fale dźwiękowe i współczynnik zaczyna się zwiększać. Znaczne zwiększenie C_x nastąpi dla zakresu prędkości od 280 m/sek do 390 m/sek tj gdy prędkość pocisku będzie się zbliżać do prędkości dźwięku i gdy powstaje fala głowicowa.

W dalszym ciągu zwiększając prędkość pocisku zauważymy, że C_x zaczyna się ponownie zmniejszać, w wyniku tego, że fala głowicowa zaczyna się wydłużać, zmniejszając tym samym swoją gęstość, co prowadzi do zmniejszenia oporu powietrza.

Współczynnik C_x jest wielkością zmienną, określaną doświadczalnie i charakteryzuje zależność siły oporu powietrza od kształtu pocisku i prędkości jego ruchu. Dlatego też współczynnik C_x nazywamy funkcją oporu lub prawem oporu.

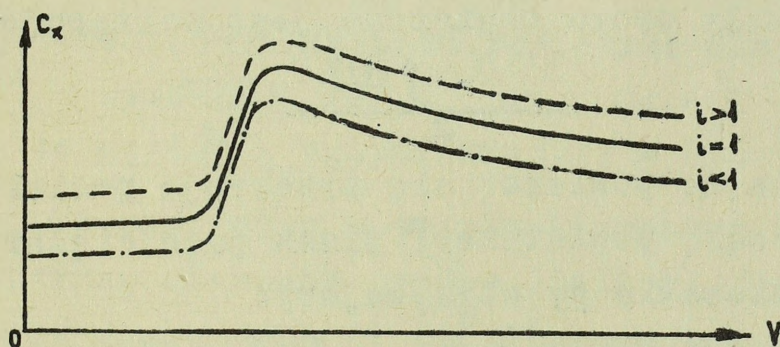
W latach 1868 - 1869 w Rosji przeprowadzono doświadczenia i określono funkcję oporu dla podłużnych wirujących pocisków. W miarę zwiększania prędkości pocisków i udoskonalania ich kształtu, funkcja oporu również była niejednokrotnie udokładniana. Obecnie stosuje się funkcję oporu z 1943 roku, otrzymaną na podstawie wielu przeprowadzonych doświadczeń. Z dotychczasowych, ona najdokładniej wyraża wielkość oporu powietrza stawianego poruszającemu się pociskowi, praktycznie dla wszystkich prędkości współczesnych pocisków. Wykres tej funkcji dla pocisku wzorcowego



Bys.29. Wykres funkcji $C_{x_{wz}}$ /wg prawa oporu 1943 r./

przedstawiono na rys. 29, gdzie na osi rzędnych odłożono wartości prędkości pocisku V , a na osi odciętych - wartości funkcji C_x . Poniżej osi rzędnych podana jest podziałka stosunku $\frac{V}{a}$, dla prędkości dźwięku $a = 340,9$ m/sek. Wykres przedstawia poglądowo charakter zmiany oporu powietrza w zależności od prędkości pocisku.

Dla pocisku, różniącego się kształtem od wzorcowego, oporu w pewnej mierze będzie się różnić od funkcji wzorcowej. Okazuje się jednak, że dla różnych co do kształtu pocisków wykresy C_x przedstawiają krzywe o jednakowej konfiguracji, różniąc się między sobą jedynie wartością odciętej. Na rys. 30 przedstawiono wykresy funkcji C_x .



Rys. 30. Wykres funkcji C_x dla pocisków o różnych właściwościach balistycznych.

dla pocisku wzorcowego /środkowa linia ciągła/, dla pocisku o lepszych właściwościach balistycznych /dolna linia kropkowana/ i dla pocisku o gorszych właściwościach balistycznych od wzorcowego /górną linia kreskowaną/. Z wykresu widzimy, że im lepszy pod względem balistycznym jest pocisk, tym mniejsze odpowiadają mu wartości funkcji oporu i na odwrót. Przy tym stosunek C_x danego pocisku do C_x wzorcowego, dla wszystkich wartości argumentu V , jest wartością w przybliżeniu stałą. Ten zbliżony przebieg funkcji oporu daje możliwość stosowania wzorcowej funkcji C_x do pocisków o różnym kształcie po wprowadzeniu tylko odpowiedniej poprawki. Poprawka ta nazywa się współczynnikiem kształtu, określona jest doświadczalnie i wyraża stosunek funkcji C_x danego pocisku do funkcji wzorcowej

$C_{x_{wz}}$ tj.

$$i = \frac{C_x}{C_{x_{wz}}}$$

$$i = \frac{C_x}{C_{x_{wz}}}$$

skąd

$$C_x = i \cdot C_{x_{wz}}$$

Współczesne pociski przedwlotnicze pod względem właściwości balistycznych bardzo mało się różnią od wzorcowego pocisku i współczynnik kształtu dla nich wynosi 0,8 - 1,1.

Należy mieć zawsze na uwadze, że pojęcie o wzorcowym pocisku jest pojęciem umownym. Taki pocisk praktycznie nie istnieje, a wartość C_x jest wartością średnią z dużej ilości funkcji, wyznaczonych drogą doświadczalną dla pocisków różnych kalibrów i kształtów.

Z uwzględnieniem współczynnika kształtu wzór dla określenia siły oporu powietrza jest następujący:

$$R = iS \frac{\rho V^2}{2} C_x \quad /39/$$

Wyrażając powierzchnię przekroju pocisku S przez kaliber d , a masę powietrza ρ przez jego ciężar G i przyspieszenie ziemskie g , otrzymujemy:

$$R = i \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{G V^2}{2g} C_x \quad /40/$$

Odpowiednio do przyjętego w artylerii układu jednostek /metr - kilogram - sekunda/ kaliber pocisku d przyjmuje się w metrach, a G przyjmuje się równą ciężarowi jednego metra sześciennego powietrza w kilogramach; nosi on nazwę ciężaru jednostkowego lub gęstości powietrza.

Gęstość powietrza zależy od ilości i masy poszczególnych cząsteczek powietrza. Im większa gęstość powietrza, tym większa bezwładność jego cząsteczek, a tym samym większy opór powietrza. Gęstość powietrza uzależniona jest od ciśnienia atmosferycznego, od temperatury i wilgotności tj. od zawartości pary wodnej w powietrzu.

W normalnych warunkach atmosferycznych /ciśnienie 750 mm, temperatura + 15°C, wilgotność względna 50%/ gęstość powietrza w punkcie wylotu $G_{ON} = 1,206 \text{ kg/m}^3$.

W miarę zmiany warunków atmosferycznych zmienia się i gęstość powietrza. Faktyczną /zmierzoną/ gęstość powietrza w punkcie wylotu oznacza się przez G_0 . Przy zwiększaniu wysokości, gęstość powietrza zmniejsza się, gdyż zmniejsza się ciśnienie atmosferyczne.

Aby wyrazić zależność siły oporu powietrza od rzeczywistych warunków atmosferycznych i od wysokości lotu pocisku, pomnożymy i podzielimy prawą stronę równania /40/ przez $G_{ON} \cdot G_0$ po czym przedstawiając mnożniki otrzymamy

$$R = i \frac{dz}{g} \cdot \frac{G_0}{G_{ON}} - \frac{G}{G_0} \cdot \frac{\pi G_{ON} \cdot v^2}{4 \cdot 2} C_x \quad /41/$$

gdzie: $\frac{G_0}{G_{ON}}$ - względna gęstość powietrza w punkcie wylotu,

$\frac{G}{G_0}$ - względna gęstość powietrza dla danej wysokości /Y/

w odniesieniu do gęstości przyziemnej /Y = 0/.

Zgodnie z przyjętym w artylerii prawem rozkładu gęstości powietrza, stosunek $\frac{G}{G_0}$ dla każdej określonej wysokości y jest wielkością stałą, dlatego też wielkość tę oznacza się jako funkcję wysokości H /y/, której wartości obliczone zawczasu podaje tabela 6:

Tabela 6

Wartości funkcji $H /y/ = \frac{G}{G_0}$

Y /km/	0	1	2	3	4	5	6
H /y/	1000	0,907	0,821	0,741	0,668	0,600	0,538
Y /km/	7	8	9	10	11	12	20
H /y/	0,481	0,428	0,381	0,336	0,293	0,250	0,0735

Praktyczne znaczenie obliczonych wartości H /y/ polega na tym, że pozwalają one na dość proste przejście od względnej gęstości powietrza w punkcie wylotu do względnej gęstości powietrza na żądanej wysokości. Stąd też gęstość powietrza określa się dla poziomu działka, którą z kolei mnoży się przez stosunek $\frac{G_0}{G_{ON}}$ otrzymując

$$\frac{G_0}{G_{ON}} \cdot H(y) = \frac{G_0 \cdot G}{G_{ON} \cdot G_0} = \frac{G}{G_{ON}}$$

Dla wygody w wyliczeniach przy zestawianiu tabel strzelniczych prawą stronę równania /41/ mnożymy przez 10^3 , po czym otrzymujemy

$$R = i \frac{d^2}{g} \cdot 10^3 \frac{G_o}{G_{ON}} \cdot H(y) \frac{\pi G_{ON} V^2}{4 \cdot 2 \cdot 10^3} C_x$$

gdzie wielkość $\frac{\pi G_{ON} \cdot V^2}{4 \cdot 2 \cdot 10^3} C_x$ charakteryzuje nam siłę oporu powietrza w zależności od prędkości pocisku; nazywamy ją funkcją oporu powietrza, oznaczając przez F /V/. Podstawiając za π i G_{ON} ich wartości liczbowe, otrzymujemy

$$F(V) = \frac{3,1416 \cdot 1,206}{8 \cdot 10} \cdot V^2 C_x = 0,474 \cdot 10^{-3} V^2 C_x$$

Wartości funkcji F /V/, również dla udogodnienia obliczeń, zestawiono w tabeli 7

Tabela 7

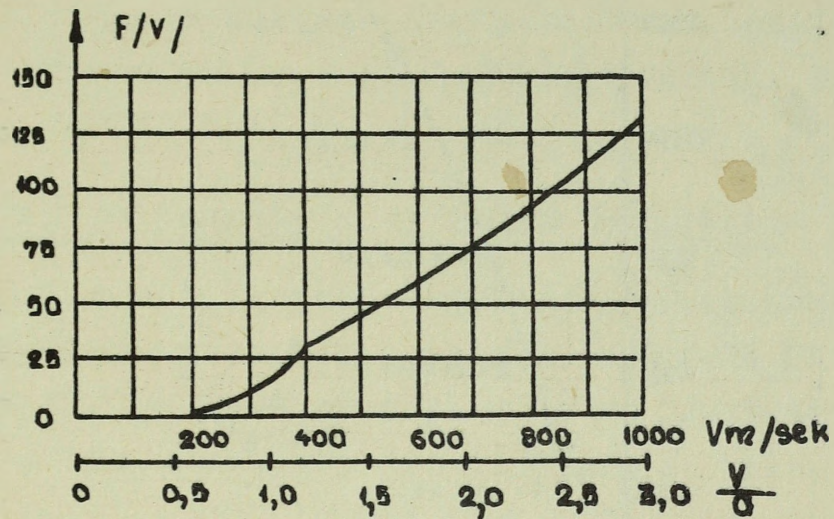
Wartości funkcji F /V/ = $0,474 \cdot 10^{-3} \cdot V^2 \cdot C_x$

V m/sek	100	200	300	400	500	600	700
F /V/	0,74	2,99	7,44	29,12	43,20	57,30	72,58
V m/sek	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
F /V/	89,49	108,1	128,9	152,2	178,6	208,3	241,2

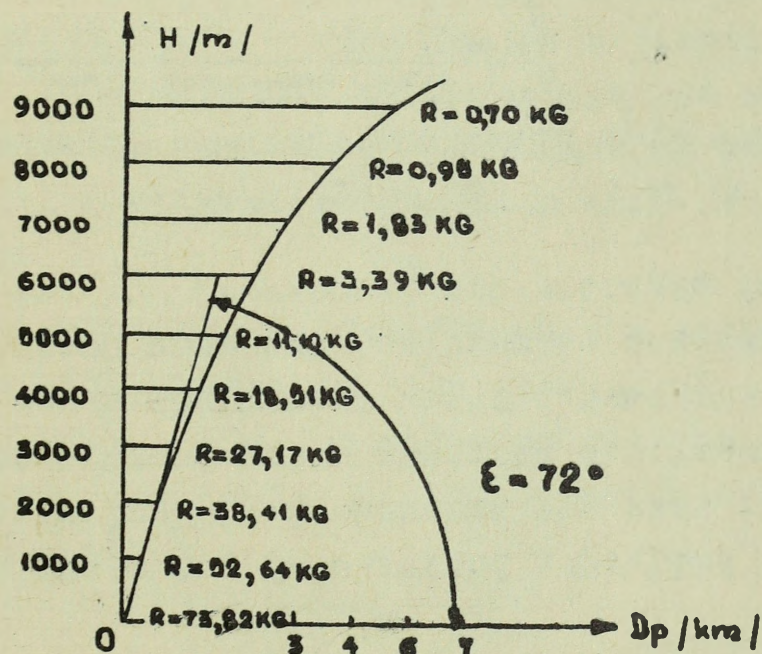
Rys. 31 przedstawia funkcję F/V/ dla wzorcowego pocisku /według prawa oporu z 1943 r./, przy prędkości dźwięku 340,9 m/sek. Na wykresie zwraca uwagę gwałtowny wzrost funkcji w granicach prędkości 280 - 390 m/sek /gdy wpływ fali dźwiękowej staje się najbardziej intensywny/.

Ostatecznie wzór na obliczenie siły oporu powietrza przyjmuje postać:

$$R = i \frac{d^2}{g} 10^3 \frac{G_o}{G_{ON}} \cdot H(y) \cdot F(V)$$



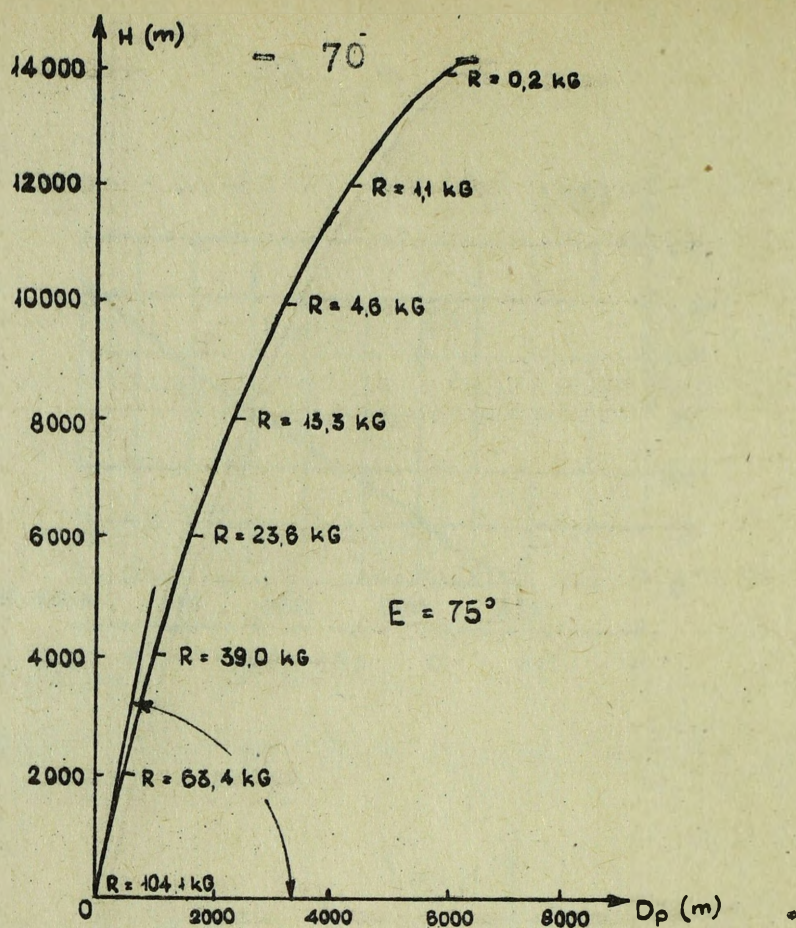
Rys. 31. Wykres funkcji $F/V/$ wg prawa oporu z 1943r./



Rys. 32. Zmiana siły oporu powietrza na torze pocisku 85 mm armaty plot $V_0 = 800$ m/sek/.

W związku z tym, że poszczególnym punktom na torze, w zależności od ich odległości i wysokości, odpowiadają różne prędkości pocisku i różne gęstości powietrza, siła oporu powietrza w poszczególnych punktach toru pocisku będzie różna.

Poglądowo wykazują to wykresy siły oporu powietrza przedstawiające zależność jej od wysokości i odległości /rys. 32 i 33/.



Rys. 33. Zmiana siły oporu powietrza na torze dla 100 mm pocisku / $V_0 = 880$ m/sek/.

Wykresy wykonano dla wznoszącej się części toru 85 mm pocisku, przy normalnych warunkach meteorologicznych, prędkości początkowej pocisku równej 800 m/sek i kącie rzutu 72° , określając wartości R dla punktów co 1000 m wysokości toru oraz dla wznoszącej się części toru 100 mm pocisku, przy prędkości początkowej 880 m/sek i kącie rzutu 75° .

Widoczne jest, że siła oporu powietrza zależy od:

- prędkości pocisku,
- kalibru i kształtu pocisku;
- warunków meteorologicznych;
- wysokości pocisku nad poziomem działka.

Należy stwierdzić, że warunki meteorologiczne określające stan warstwy atmosfery na danej wysokości w określonym czasie dość szybko zmieniają się, co praktycznie pociąga za sobą błędy w strzelaniu. Dlatego niezbędne jest stałe posiadanie możliwie najbardziej dokładnych danych o warunkach meteorologicznych na całej długości toru lotu pocisku.

Na wielkość siły oporu powietrza ma również wpływ ruch wirowy pocisku. Ruch wirowy pocisku jest wielkością zmienną i zależy od położenia pocisku na torze oraz kształtu toru, zależnego z kolei od kąta podniesienia. Wpływ ruchu wirowego pocisku określono doświadczalnie przez strzelania

wykonane przy różnych kątach podniesienia i uwzględnia się go przez wprowadzenie odpowiedniej poprawki do współczynnika kształtu i.

11. Przyspieszenie siły oporu powietrza

W momencie wylotu pocisk posiada pewną określoną energię kinetyczną $\frac{mV^2}{2}$. W czasie lotu ztraca on pewną część tej energii na pokonanie siły oporu powietrza.

Masa pocisku w tym wypadku jest wielkością stałą, a więc pocisk traci energię kinetyczną przez zmniejszenie swej prędkości na całej długości toru.

W mechanice zmiana prędkości w jednostce czasu nazywa się przyspieszeniem. W wypadku gdy prędkość wzrasta, przyspieszenie ma znak dodatni, w przeciwnym zaś wypadku znak ujemny. Siła oporu powietrza działająca na pocisk zmniejsza jego prędkość, a więc przyspieszenie siły R jest wielkością ujemną.

Z mechaniki wiadomo, że przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do siły, którą zostało wywołane i odwrotnie proporcjonalne do masy ciała, na które ta siła działa. W związku z powyższym, oznaczając przyspieszenie literą j możemy napisać

$$j = \frac{R}{m}$$

a po podstawieniu wartości R ze wzoru /42/ otrzymamy

$$j = i \frac{d^2}{m_2 q} 10^3 \frac{G_0}{G_{0N}} H / y / \cdot F / V /$$

Iloczyn masy /m/ i przyspieszenia ziemskiego /g/ równa się ciężarowi pocisku /q/ w kilogramach, więc:

$$j = i \frac{d^2}{q} 10^3 \frac{G_0}{G_{0N}} H / y / F / V / \quad /43/$$

Rozpatrując równanie /34/ stwierdzamy, że $i \frac{d^2}{q} 10^3 \frac{G_0}{G_{0N}} = C$ dla określonego pocisku jest wielkością stałą.

Uwzględniając powyższe, otrzymamy następujący wzór dla określenia przyspieszenia siły oporu powietrza

$$j = cH / y / F / V / \quad /44/$$

Tabele strzelnicze zestawia się dla normalnych warunków dla których $G_0 = G_{0N}$, a więc stosunek $\frac{G_0}{G_{0N}} = 1$ i w związku z tym możemy przyjąć:

$$c = i \frac{d^2}{q} 10^3 \quad /45/$$

Ze wzoru /45/ widzimy, że wielkość c określają: współczynnik kształtu pocisku, jego kaliber i ciężar, czyli czynniki charakteryzujące właściwości balistyczne danego pocisku; dlatego też mnożnik c nazywamy współczynnikiem balistycznym.

Rozpatrując równanie /44/ dochodzimy do wniosku, że przyśpieszenie siły oporu powietrza j jest wprost proporcjonalne do współczynnika balistycznego C , więc żeby zmniejszyć działanie siły oporu powietrza, musimy dążyć do zmniejszenia współczynnika balistycznego. To zażądanie staje się szczególnie ważne przy dużych prędkościach pocisku, gdyż funkcja oporu F/V osiąga znaczne wartości.

Jak wynika ze wzoru /45/, współczynnik balistyczny możemy zmniejszyć przez:

- zmniejszenie wielkości współczynnika kształtu /i/, co uzyskujemy przez nadanie pociskowi najbardziej odpowiedniego kształtu;

- zmniejszenie stosunku $\frac{d^2}{q}$.
Przy stałej wartości kalibru stosunek $\frac{d^2}{q}$ może być zmniejszony drogą zwiększenia mianownika, czyli ciężaru pocisku q .

Ciężar pocisku określonego kalibru uzależniony jest od grubości ścianek pocisku, od ciężaru ładunku kruszącego i od długości pocisku. Dla danego typu pocisku stawia się pewne wymogi w zależności od jego zastosowania, więc grubość ścianek i ciężar ładunku są odpowiednio dobrane. Zatem ciężar pocisku zazwyczaj zwiększa się poprzez zwiększenie jego długości. Nieograniczenie zwiększać długości pocisku również nie możemy, gdyż długi pocisk traci równowagę w czasie lotu, w związku z czym otrzymujemy gorsze jego właściwości balistyczne.

Współczesne dalekonośne pociski posiadają długość około 5,5 kalibra.

Do charakterystyk balistycznych pocisku zaliczamy również tak zwany poprzeczny ciężar pocisku. Jest to stosunek ciężaru pocisku do powierzchni poprzecznego przekroju;

$$\frac{q}{S} = \frac{q}{\pi d^2 : 4} = \frac{4q}{\pi d^2} \quad / \text{ciężar pocisku } q \text{ wyrażony}$$

w kilogramach, a kaliber d w centymetrach/.

Im większy poprzeczny ciężar pocisku, tym mniejszy stosunek $\frac{d^2}{q}$, a tym samym współczynnik balistyczny i siła oporu powietrza również mniejsze.

W pociskach geometrycznie podobnych^{x/}, poprzeczny ciężar pocisku wzrasta ze zwiększeniem kalibru. Zjawisko to tłumaczy się tym, że powierzchnia poprzecznego przekroju pocisku S zmienia się proporcjonalnie do kwadratu kalibru, a objętość pocisku - tym samym jego ciężar q - proporcjonalnie do sześciangu kalibru.

Przykładowo obliczmy poprzeczny ciężar pocisku /PC/, współczynnik balistyczny /c/ i przyśpieszenie siły oporu powietrza j dla punktu wylotu przy normalnej gęstości powietrza, dla pocisku 100 mm o ciężarze 15,6 kg, dla pocisku 85 mm o ciężarze 9,2 kg i dla pocisku 57 mm o ciężarze 2,8 kg. Przystępując do obliczeń zakładamy, że powyższe pociski są geometrycznie podobne, posiadają współczynnik kształtu $i = 1,0$ oraz mają jednakowe prędkości początkowe $V_0 = 800$ m/sek.

Dla 100 mm pocisku

$$PC = \frac{4 \cdot 15,6}{3,14 \cdot 10^2} = 0,199 \text{ kg/cm}^2; \quad c = \frac{1 \cdot 0,1^2 \cdot 1000}{15,6} = 0,641$$

$$j = 0,641 \cdot 108,1 = - 69,3 \text{ m/sek}^2$$

Dla 85 mm pocisku

$$PC = \frac{4 \cdot 9,2}{3,14 \cdot 8,5^2} = 0,162 \text{ kg/cm}^2; \quad c = \frac{1 \cdot 0,085^2 \cdot 1000}{9,2} = 0,785$$

$$j = 0,785 \cdot 108,1 = - 84,9 \text{ m/sek}^2$$

x/ Pociski różnych kalibrów geometrycznie podobne są wtedy, gdy ich względne długości wyrażone w kalibrach są równe, a kształty jednakowe.

Dla 57 mm pocisku

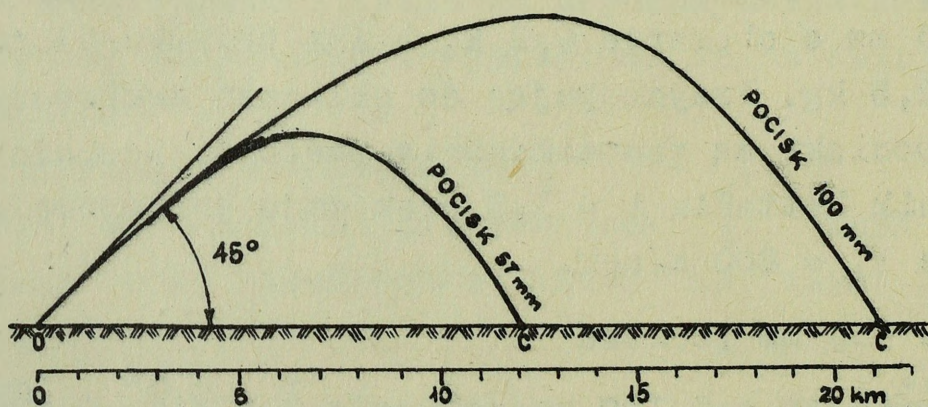
$$PC = \frac{4 \cdot 2,8}{3,14 \cdot 5,7^2} = 0,110 \text{ kg/cm}^2; c = \frac{1 \cdot 0,057^2 \cdot 1000}{2,8} = 1,160$$

$$j = 1,160 \cdot 108,1 = - 125,4 \text{ m/sek}^2$$

Obliczenia powyższe wskazują na to, że pociski większych kalibrów są bardziej korzystne, gdyż przy jednakowych prędkościach początkowych posiadają mniejszy współczynnik balistyczny i mniejszą bezwzględną wartość przyspieszenia siły oporu powietrza.

Prowadzi to do zwiększenia donośności, co jest szczególnie ważne dla artylerii przeciwlotniczej, ponieważ skraca czas lotu pocisku.

Wpływ kalibru na odległość strzelania najbardziej wymownie przedstawia nam rys. /34/, gdzie pokazane są tory 100 mm pocisku $/V_0 = 880 \text{ m/sek/}$ i 57 mm pocisku $/V_0 = 960 \text{ m/sek/}$ odpowiadające kątom rzutu równemu 45° /7 - 50/.



Rys. 34. Tory pocisków kalibru 100 mm i 57 mm.

Rozpatrując poszczególne tory na rysunku stwierdzamy, że 57 mm pocisk leci bliżej, chociaż jego prędkość początkowa jest znacznie większa od pocisku 100 mm. Dla dokładniejszego rozpatrzenia zależności czasu lotu od kalibru pocisku, podajemy tabelę 8 gdzie podane są czasy lotów pocisków do punktów w przestrzeni, o jednakowych współrzędnych dla poszczególnych kalibrów.

Tabela 8

Czas lotu pocisku 57 mm i 100 mm w sekundach

Kaliber w mm	57	100	57	100	100	100	
wysokość w m	4000		6000		10000		12000
odle- głość pozioma w m							
1000	6,9	5,7	13,1	9,2	18,8	25,7	
2000	7,8	6,3	14,1	9,7	19,3	26,2	
4000	11,6	8,4	18,2	11,6	21,1	28,2	
6000	-	11,7	-	14,7	24,1	31,7	
8000	-	15,9	-	18,9	28,7	37,0	
10000	-	21,3	-	24,3	34,7	45,8	
12000	-	27,9	-	31,0	43,4	-	
16000	-	46,1	-	-	-	-	

Zastanówmy się jeszcze nad równaniem /44/. Widzimy, że przyśpieszenie siły oporu powietrza jest proporcjonalne do funkcji F/V , która z kolei zależy od prędkości pocisku V . Z tego wynika, że im większa prędkość pocisku, tym większe jest przyśpieszenie siły oporu, czyli innymi słowy, pocisk o większej prędkości szybciej ją traci. Niemniej jednak zwiększenie prędkości początkowej pocisku pociąga za sobą zwiększenie donośności. Na przykład 100 mm pocisk przeciwlotniczy $V_0 = 880$ m/sek/ przy zwiększeniu prędkości początkowej o 10%, zwiększa swoją donośność o około 9%.

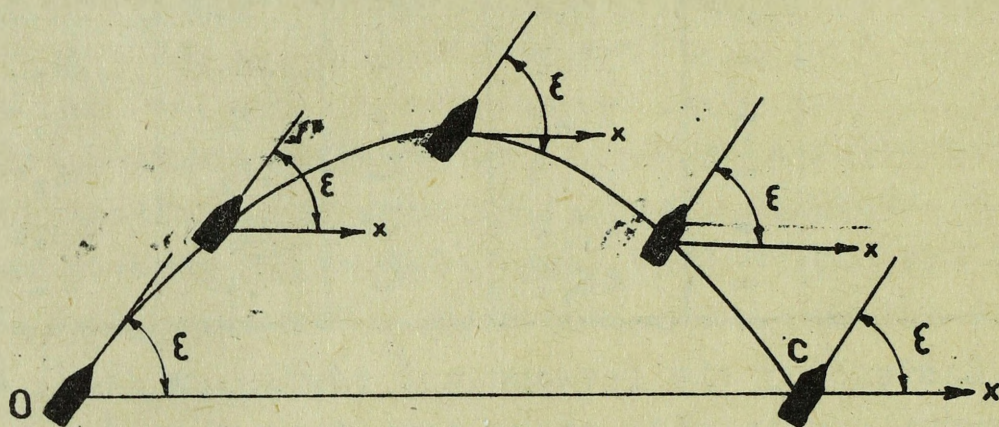
Na podstawie powyższych rozważań dochodzimy do wniosku, że ażeby zwiększyć donośność pocisku należy:

- 1/ ulepszać kształt pocisku,
- 2/ zwiększać prędkość początkową,
- 3/ zwiększać kaliber pocisku.

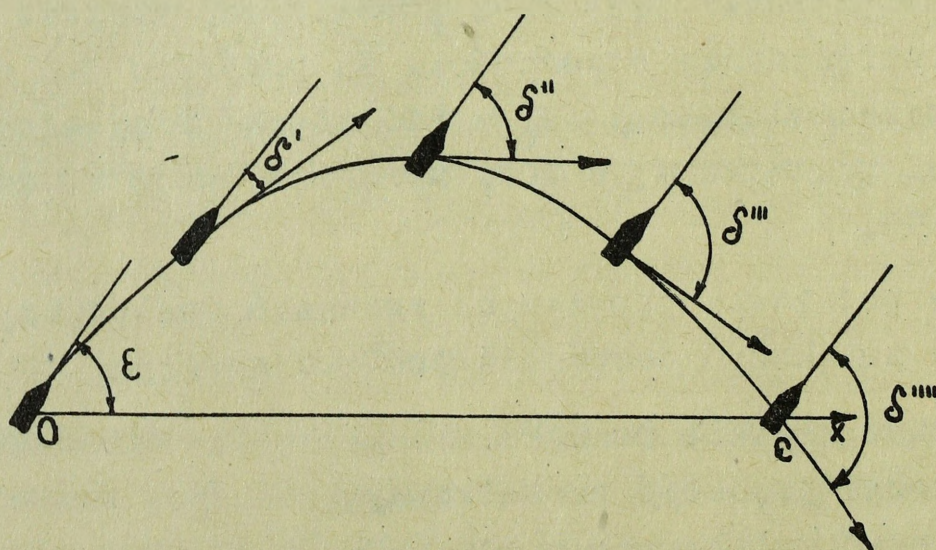
Oprócz tego należy również mieć na uwadze, że zwiększenie kalibru pocisku pociąga za sobą zwiększenie jego mocy. Na przykład moc pocisku zwiększa się 8 razy przy zwiększaniu jego kalibru 2 razy.

12. Ruch wirowy pocisku. Zboczenie

Gdy pocisk leci w próżni działa na niego tylko jedna siła - siła ciężkości q , skierowana od środka ciężkości prostopadle. Dlatego też oś podłużnego, nie wirującego pocisku, przy jego locie w próżni, na przestrzeni całego toru zachowuje stałe położenie, tworząc z poziomem stały kąt równy kątowi rzutu /rys. 35/. Przy tym w miarę przesuwania się po torze, tworzy się pomiędzy osią pocisku a kierunkiem jego ruchu /styczną do toru/ wciąż wzrastający kąt, zwany kątem nutacji δ /rys. 36/

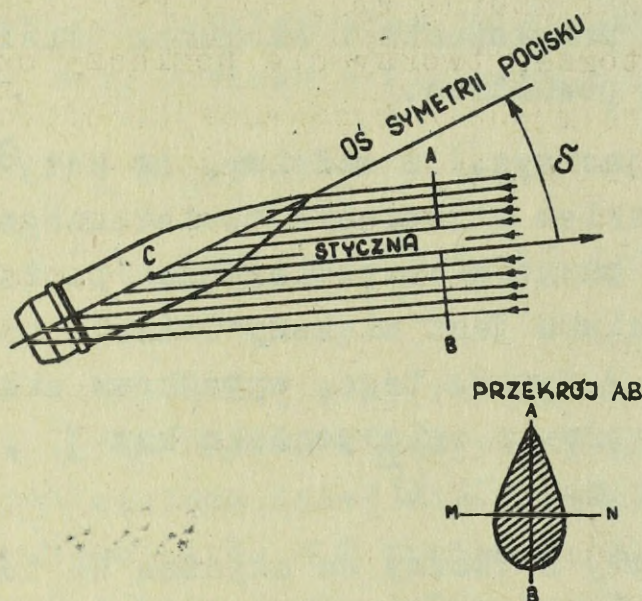


Rys. 35. Lot nie wirującego pocisku w próżni.



Rys. 36. Zmiana kąta nutacji w miarę przesuwania się nie wirującego pocisku po torze w próżni.

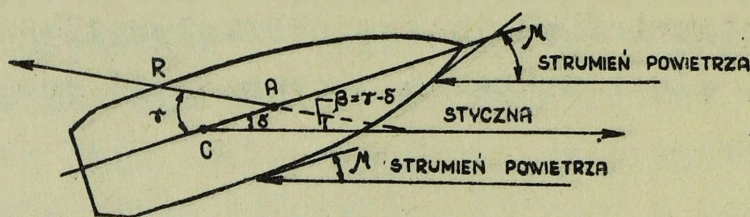
Gdyby ruch pocisku w powietrzu odbywał się w ten sposób, to strumień powietrza oddziaływałby nie tylko na wierzchołek, ale i na pewną boczną część powierzchni pocisku /rys. 37/



Rys. 37. Działanie powietrza na pocisk, którego oś symetrii nie pokrywa się z kierunkiem jego ruchu.

Jeśli ze środka masy pocisku C przeprowadzimy prostą MN, równoległą do poziomu i prostopadłą do płaszczyzny strzelania, to większa część płaszczyzny, podlegającej działaniu strumienia powietrznego, będzie znajdowała się ponad tą linią /rys. 37/.

Wypadkowa siła oporu poszczególnych cząsteczek strumienia powietrznego przechodzi wtedy przez geometryczny środek powierzchni, na którą oddziaływuje. Jeżeli przenieśmy punkt przyłożenia tej wypadkowej na oś symetrii pocisku, to przekonamy się, że nie pokrywa się on z punktem ciężkości pocisku, a leży bliżej jego wierzchołka. Ten punkt A nazywa się środkiem oporu i jego oddalenie od środka masy C zależy od długości pocisku /im dłuższy pocisk, tym większa odległość pomiędzy środkiem masy a środkiem oporu/.

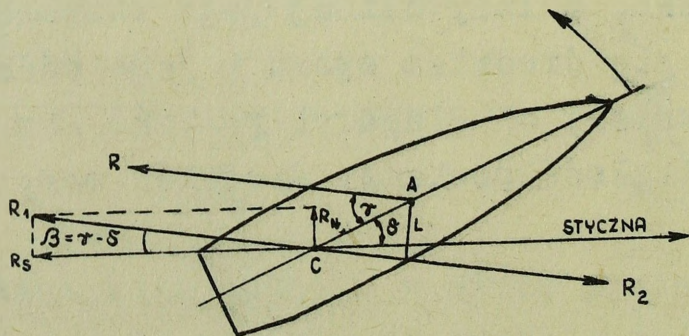


Rys. 38. Punkt przyłożenia i kierunek działania siły oporu powietrza.

Rozpatrując rys. 38 widzimy, że kąt β zawarty pomiędzy kierunkiem strumienia powietrznego i styczną do poszczególnych punktów na powierzchni pocisku, u wierzchołka pocisku jest większy aniżeli na jego części cylindrycznej. W wyniku tego, wypadkowa siły oporu powietrza R , tworzy z osią pocisku kąt γ , który jest większy od kąta nutacji δ .

Wektor siły R tworzy ze styczną do toru niewielki kąt $\beta = \gamma - \delta$. W tym wypadku siła oporu powietrza nie tylko będzie hamowała pocisk, lecz również będzie naruszała równowagę osi pocisku.

Dla badania działania oporu powietrza przykładamy do środka masy dwie siły R_1 i R_2 równoległe do siły R , równe jej co do wielkości, lecz skierowane w przeciwnych kierunkach. Wprowadzenie takich sił, zgodnie z prawami mechaniki, nie okaże żadnego wpływu na lot pocisku. Rozkładając teraz siłę R_1 na dwie składowe - jedną wzdłuż kierunku stycznej do toru R_s , a drugą wzdłuż prostopadłej do niej, otrzymamy ostatecznie następujące siły, uwidocznione na rys. 39.



Rys. 39, Para sił

1. Siła R_s przyłożona do środka masy pocisku i skierowana wzdłuż stycznej do toru w kierunku przeciwnym do lotu pocisku; siła ta hamuje ruch środka masy pocisku, nadając mu przyśpieszenie styczne

$$j_s = j \cos \gamma - \delta / k$$

2. Siła R_N przyłożona również do środka masy pocisku i skierowana wzdłuż prostopadłej do stycznej; siła ta odchyła środek masy pocisku w kierunku odchylenia jej wierzchołka

$$j_N = j \sin \gamma - \delta / k$$

3. Siły R_1 i R_2 tworzące parę sił dążącą do odwrócenia pocisku głowicą do tyłu.

Dzięki działaniu tej pary sił, pocisk poleciałby koziółkując, co jest bardzo niedogodne, gdyż zwiększa się powierzchnia podlegająca działaniu cząsteczek powietrza. Wskutek tego wzrasta siła R_1 i zmniejsza się zasięg strzelania. Oprócz tego /przy takim locie pocisku/ zwiększa się rozrzut, zmniejsza się zdolność przebijania i niemożliwe staje się zastosowanie zapalników uderzeniowych o działaniu bezwładnościowym.

W mechanice działania pary sił uwzględnia się tak zwany moment pary, równy iloczynowi siły i ramienia siły. Zgodnie z rys. 39 w pocisku artyleryjskim moment pary wynosi.

$$M = RL = R \cdot AC \sin \gamma$$

Z tego wynika, że przy danej wartości siły R , zmniejszenie momentu pary sił można osiągnąć albo przez zmniejszenie odległości AC , albo przez zmniejszenie kąta γ .

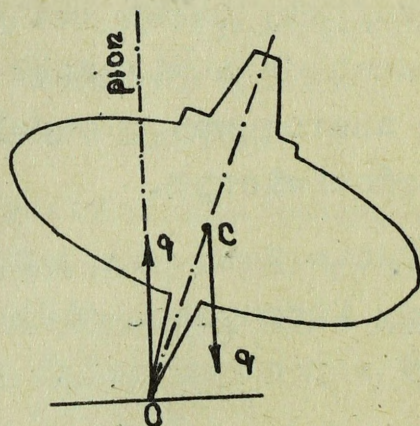
Odcinek AC można skrócić także drogą zmniejszenia długości pocisku, ale jest to niekorzystne zarówno ze względów balistycznych /powoduje zmniejszenie jego obciążenia poprzecznego/, jak i ze względu na moc pocisku.

Pozostaje możliwość zmniejszenia kąta γ , który powstaje, jak już to wyjaśnialiśmy, wskutek niepokrywania

się osi pocisku z kierunkiem jego lotu. Wobec tego należy związać oś pocisku ze styczną do toru, czyli zmusić ją, aby nie odchylała się od stycznej, lecz towarzyszyła jej przez cały czas lotu. Osiąga się to przez nadanie pociskowi szybkiego ruchu wirowego wokół swej osi.

Ażebym zrozumieć zjawiska występujące przy locie wirującego pocisku w powietrzu rozpatrzmy najpierw ruch wirowy zwykłego baka.

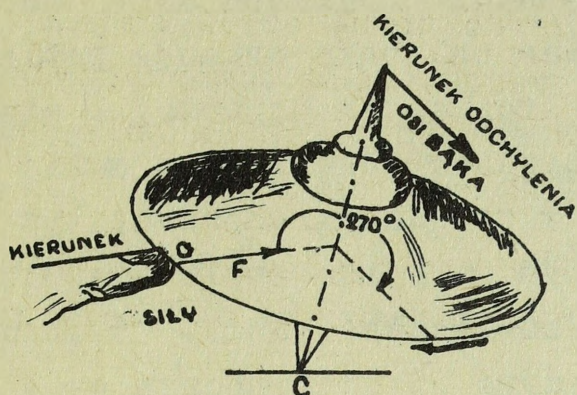
Jak wiadomo, nie wirujący bąk nie może stać na swojej ostrej nóżce, gdyż siła ciężenia bąka q i reakcja podstawy q' tworzą parę sił, która przewraca go w stronę, w którą odchylna jest jego oś pionowa /rys. 40/. Ażebym bąk zachował swoją stateczność, należy nadać mu szybki ruch wirowy wokół jego osi. Jeżeli przy tym do dowolnego punktu bąka a /rys. 41/ przyłożymy pewną siłę F ,



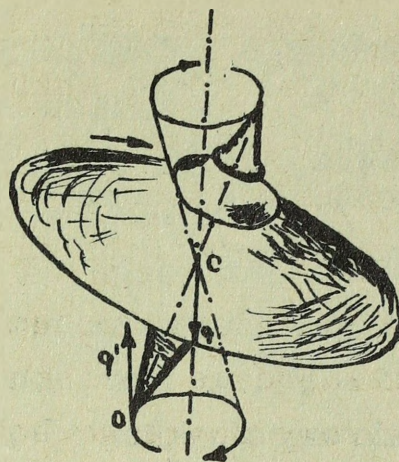
Rys. 40. Siły działające na nie wirujący bąk.

prostopadłą do jego osi, to nie spowoduje to odchylenia osi w kierunku działania siły F , lecz prostopadle do niej w kierunku, w którym znajdzie się punkt a , po wykonaniu przez bąka $3/4$ pełnego obrotu /po obróceniu się bąka o 270° /.

Zjawisko to nazywa się zjawiskiem żyroskopowym. Prowadzi ono do tego, że przy wirowaniu bąka oś jego nie pokrywa się z pionem, lecz wolno wiruje wokół niego po pewnej powierzchni stożkowej /rys. 42/.

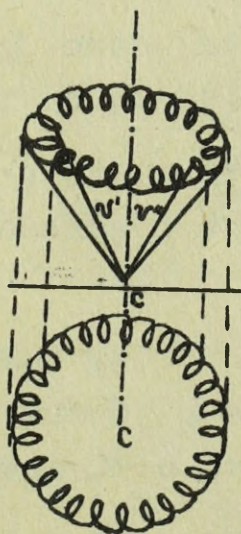


Rys. 41. Zjawisko żyroskopowe



Rys. 42. Wolny stożkowy ruch bąka.

Ten wolny ruch stożkowy osi bąka nazywa się precesją i powstaje w sposób następujący: skoro tylko oś bąka odchyli się od pionu, to siła ciężenia q i reakcja podstawy q' utworzą parę sił, dążącą do sprowadzenia osi bąka na płaszczyznę tej pary sił, ale dzięki zjawisku żyroskopowemu oś bąka obróci się nie w płaszczyźnie działania tej pary sił, lecz prostopadle do niej, przy tym w ślad za osią obróci się również płaszczyzna działania pary sił, co z kolei spowoduje nowy obrót osi bąka itd.



Rys. 43. Precesja.

Precesja, czyli wolny ruch stożkowy następuje w tym kierunku, w którym wiruje bąk, jednak szybkość precesji jest znacznie mniejsza niż szybkość ruchu wirowego bąka. Kąt utworzony pomiędzy osią bąka a pionem nazywa się kątem precesji. Kąt precesji posiada właściwość

okresowego zmieniania się w pewnych granicach od V' do V'' /rys. 43/, w wyniku czego koniec osi bąka opisuje pętle pomiędzy dwoma powierzchniami stożka. Im szybciej i staranniej /bez zrywów/ zostanie rozpędzony bąk i czym mniej odchyłona jest jego oś od pionu w momencie rozruchu, tym mniejszy jest kąt precesji i tym mniejsza amplituda wahań $V' - V''$, a tym samym lepsza stateczność bąka. Oś wolnego stożkowego ruchu /precesji/ nazywa się dynamiczną osią obrotu. Dynamiczna oś obrotu leży zawsze w płaszczyźnie działania pary sił, a więc jeżeli para sił q i q' działa w pionowej płaszczyźnie, to oś dynamiczna zawsze jest prostopadła do poziomu.

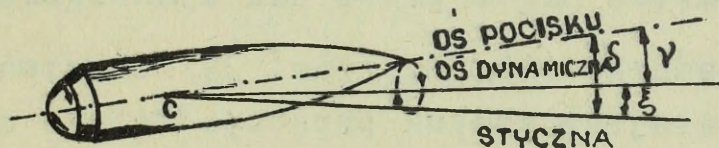
Po rozpatrzeniu zjawisk zachodzących przy wirowaniu bąka, możemy ustalić pewne ogólne zasady zachowania się symetrycznych ciał, wirujących wokół osi symetrii i poddanych działaniu pary sił:

- skutek działania pary sił oś obrotowa ciała wykonuje wolny ruch stożkowy /precesję/,
- precesja następuje wokół osi dynamicznej, leżącej w płaszczyźnie działania pary sił, powodującej tę precesję;
- precesja skierowana jest tak samo jak wirujące ciało, lecz jej prędkość jest mniejsza od prędkości wirowania;
- wartość kąta precesji zmienia się okresowo w pewnych granicach tak długo, dopóki prędkość wirowania ciała jest wystarczająco duża.

Powyższe twierdzenia możemy całkowicie zastosować do wirującego podłużnego pocisku, jednak warunki lotu pocisku różnią się od wirowania bąka, a mianowicie:

- środek masy pocisku przesuwa się z dużą prędkością po krzywoliniowym torze;
- płaszczyzna pary sił R i R_2 /rys. 39/, powodującej precesję pocisku, przechodzi przez oś pocisku i przez styczną do toru /a nie przez pion, jak to miało miejsce u bąka/;
- styczna do toru nie zachowuje swojego kierunku w przestrzeni tak jak pion/, lecz ciągle zmienia swój kierunek.

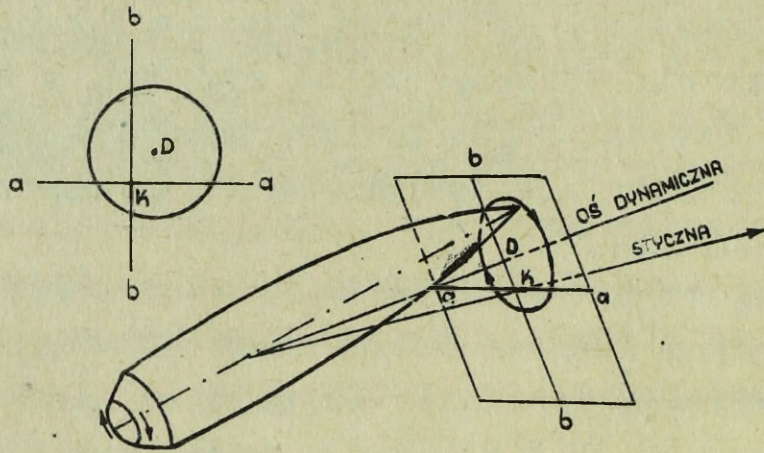
Ponieważ płaszczyzna pary sił R i R_2 przechodzi przez oś pocisku i przez styczną, oś dynamiczna wirującego pocisku powinna pokrywać się ze styczną do toru. Jednak styczną do toru ciągle zmienia swoje położenie i kierunek, w wyniku czego oś dynamiczna nie będzie się z nią pokrywała. Oś wirującego pocisku zgodnie z zasadami precesji będzie dążyła za zmieniającą swój kierunek styczną, pozostając jednak ciągle nieco w tyle. Wraz z osią pocisku /również z pewnym opóźnieniem/ nadaża za styczną dynamiczna oś pocisku, która nie pokrywa się ze styczną, a znajduje się nieco wyżej, tworząc z nią pewien dodatni kąt ξ , rys 44/. W miarę przesuwania się pocisku na torze wartość tego kąta nieznacznie wuraasta.



Rys. 44. Stożkowy ruch pocisku wokół osi dynamicznej.

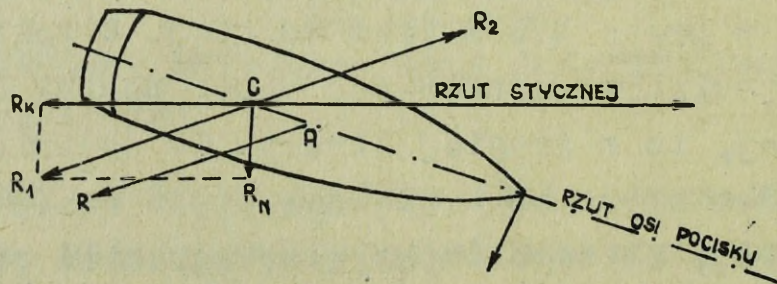
Kąt ξ jest znacznie mniejszy od kąta precesji, w wyniku czego pocisk wykonując ruch precesyjny wokół osi dynamicznej, znajduje się okresowo powyżej lub poniżej stycznej, w prawo lub w lewo od niej. W związku z tym, strumień powietrza napotykaną przez pocisk działa na niego to z jednej, to z drugiej strony. Oś dynamiczna opóźnia się względem stycznej i większą część czasu znajduje się powyżej niej, dlatego napotykaną strumień powietrza przez dłuższy przeciąg czasu działa na pocisk z dołu powodując, że średni kierunek wektora siły oporu powietrza R oddziałuje na pocisk z dołu, dążąc do przewrócenia pocisku głowicą do tyłu.

Taki kierunek działania siły oporu powietrza w połączeniu ze zjawiskiem żyroskopowym /przy prawoskrętnym gwintowaniu luf/ powoduje przesunięcie się osi dynamicznej w prawo od stycznej /rys. 45/. Na skutek tego przy wolnym ruchu stożkowym oś pocisku przez większy przeciąg czasu znajduje się w prawo od stycznej i wektor siły R jest średnio odchylony w prawo.



Rys. 45. Przesunięcie się w prawo osi dynamicznej.

Przy rozkładaniu siły R_1 /rys. 39/ otrzymaliśmy składową R_N , działającą wzdłuż prostopadłej do stycznej i odciągającą środek masy pocisku w kierunku, w jakim odchylił się wierzchołek pocisku. Ponieważ jednak wierzchołek pocisku przeważnie znajduje się na prawo od stycznej, to siła R_N która średnio skierowana jest w prawo, systematycznie odciąga środek masy pocisku w prawo od płaszczyzny rzutu /rys. 46/.

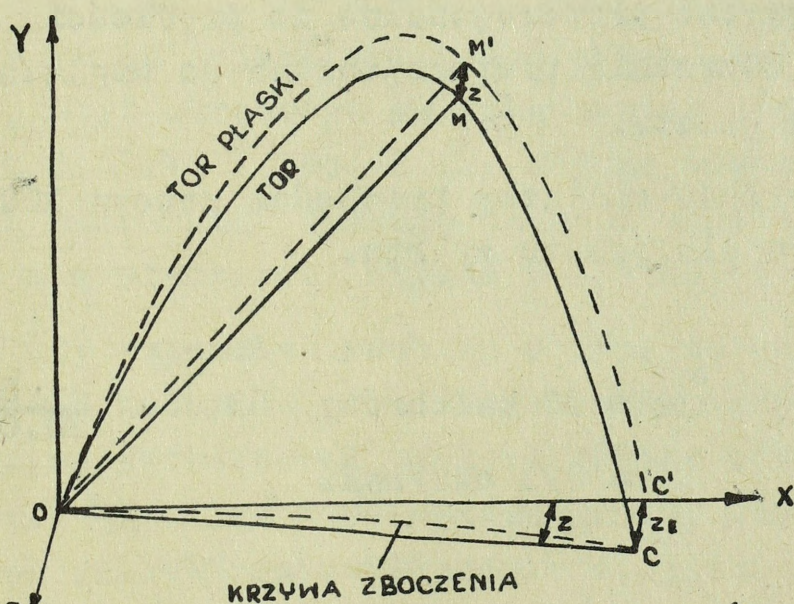


Rys. 46. Działanie pary sił w płaszczyźnie poziomej.

Boczne odchylenie podłużnego wirującego pocisku od płaszczyzny rzutu, spowodowane ruchem wirowym pocisku w powietrzu nazywa się zбочeniem.

Termin ten oznacza zarówno samo zjawisko, jak i wielkość odchylenia bocznego spowodowanego omówionymi przyczynami. Zбочenie skierowane jest w stronę, w którą wiruje pocisk /przy gwincie prawoskrętnym - w prawo, przy lewoskrętnym - w lewo/ i określa się je drogą doświadczalną w punkcie upadku /uderzenia, rozprysku/. Wartość liniową zбочenia Z_E wyraża się w metrach, a kątową Z w tysięcznych.

W wyniku zбочenia tor podłużnego pocisku w powietrzu staje się krzywą o podwójnej krzywiznie. /rys. 47/.



Rys. 47. Tor pocisku jako krzywa o podwójnej krzywiznie.

Rzut toru na płaszczyznę strzelania Oxy nazywamy torem płaskim, a rzut toru na płaszczyznę poziomą nazywamy krzywą zбочenia. Wielkość zбочenia zależy w zasadzie od odległości strzelania i prędkości wirowania pocisku.

Rozpatrując czas lotu pocisku stwierdzamy, że jest on nieproporcjonalny w stosunku do odległości, z tego też wynika, że wielkość zбочenia nie jest proporcjonalna do odległości strzelania. Zwiększenie zбочenia postępuje szybciej, aniżeli zwiększanie odległości. Odpowiednio do tego krzywa zбочenia swoją wypukłością zwrócona jest w stronę płaszczyzny strzelania.

W miarę wzrostu prędkości wirowania pocisku zwiększa się ilość obrotów wykonanych przez pocisk w czasie jego lotu, a w związku z tym wzrasta również zboczenie.

Prędkość kątową wirowania pocisku wokół swej osi możemy obliczyć za pomocą wzoru

$$\omega = \frac{V_0}{\eta_0 d} \quad /46/$$

gdzie: V_0 - prędkość początkowa pocisku w m/sek.

η_0 - względna /wyrażona w kalibrach/ długość skoku gwintu,

d - kaliber pocisku w metrach.

Długością skoku gwintu nazywamy odległość mierzona wzdłuż przewodu lufy, na której gwint wykonuje jednej pełny obrót. Ze wzoru /46/ wynika, że prędkość kątową wirowania pocisku jest wprost proporcjonalna do prędkości początkowej i odwrotnie proporcjonalna do względnej długości skoku gwintu.

Dla przykładu obliczmy prędkości kątowe 100 mm i 57 mm pocisku dla punktu wylotu.

100 mm pocisk

$$V_0 = 880 \text{ m/sek}; \quad \eta_0 = 30 \text{ kalibrów}; \quad \omega = \frac{880}{30 \cdot 0,100} \approx 293 \text{ obr/sek.}$$

57 mm pocisk

$$V_0 = 960 \text{ m/sek.} \quad \eta_0 = 35 \text{ kalibrów}; \quad \omega = \frac{960}{35 \cdot 0,057} \approx 481 \text{ obr/sek.}$$

Z powyższych przykładów wynika, że prędkość obrotu pocisku w nowoczesnych działach jest dość znaczna.

Doświadczenia wykazują, że wartość zboczenia jest odwrotnie proporcjonalna do względnej długości skoku gwintu.

O długości skoku gwintu decyduje wymagana prędkość wirowania, jaką należy nadać pociskowi, ażeby zachował on stateczność lotu. Im mniejsza stateczność pocisku, tym szybciej powinien on obracać się wokół swej osi i tym krótszy powinien być skok gwintu działa.

Stateczność pocisku w czasie lotu zależy od momentu: Moment ten jest wprost proporcjonalny do wartości siły R i długości ramienia L .

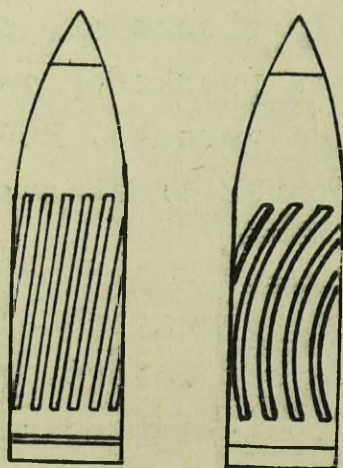
Wspominaliśmy już, że w miarę wzrostu długości pocisku, zwiększa się odległość pomiędzy jego środkiem masy C a środkiem oporu A , co przy zachowaniu pozostałych warunków powoduje zwiększenie ramienia L .

Oprócz tego przy wzroście długości pocisku wzrasta również powierzchnia, na którą działa napotkany strumień powietrza, co powoduje zwiększenie się siły R .

Wobec tego przy zwiększeniu długości pocisku zmniejsza się jego stateczność, czyli że zwiększając długość pocisku należy zwiększyć jednocześnie prędkość jego wirowania, zmniejszając długość skoku gwintu.

Nie można jednak zwiększać skreću gwintu nieograniczenie, gdyż przy zbyt skręconym gwincie nastąpi ścinanie pierścieni wiodących pocisku i pocisk nie uzyska wówczas potrzebnej prędkości wirowania. Dlatego długość współczesnych pocisków nie przekracza zwykle 5-5,5 kalibrów.

Należy wspomnieć również o tym, że ruch wirowy możemy nadać pociskowi bez stosowania pierścieni wiodących, nacinając na powierzchni pocisku gwinty odpowiadające gwintom lufy /rys. 48 /. W tym wypadku możemy zwiększyć skreću gwintu, co pozwoli na zwiększenie długości i ciężaru pocisku.



Rys. 48. Gwintowany i wielostopniowy pocisk.

Oprócz tego, strzelając gwintowanymi pociskami, możemy uzyskać zwiększenie prędkości początkowej, co się tłumaczy tym, że część energii gazów prochowych wykorzystywana w normalnych pociskach, dla pokonania oporu wciskania się pierścieni widzących w gwinty lufy, w tym wypadku będzie wykorzystana dla zwiększenia prędkości początkowej pocisku.

Prowadzono również doświadczenia z tak zwanymi polygonalnymi pociskami, które zamiast części cylindrycznej posiadają gwintową wielokątną powierzchnię. Przekrój poprzeczny luf do strzelania takimi pociskami posiadał kształt wieloboku. Jednak ze względu na trudności techniczne wykonania takich pocisków, jak i koszty nie znalazły one zastosowania.

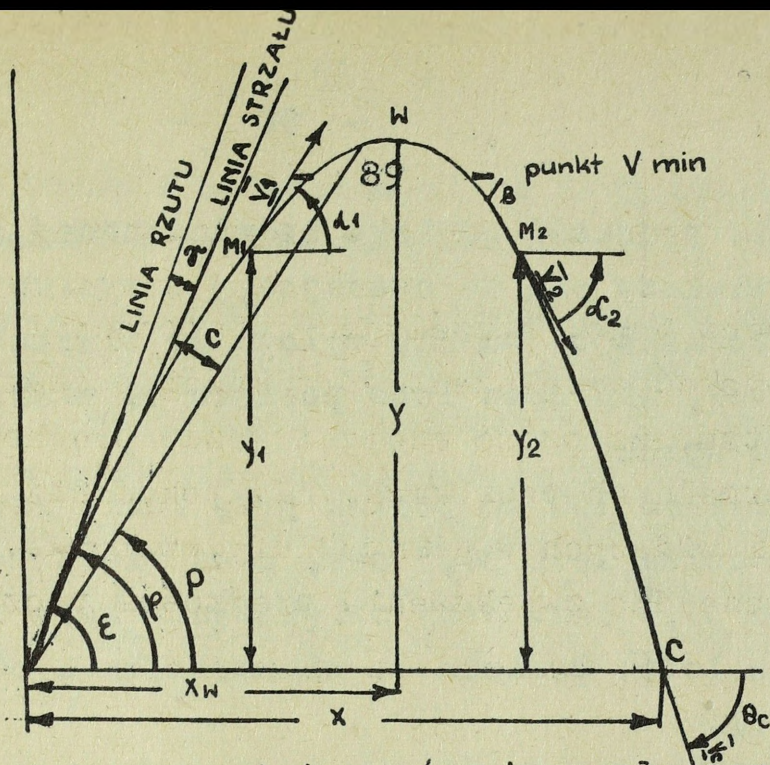
Należy mieć również na uwadze to, że przy bardzo dużych prędkościach wirowania wystąpi ponadstateczność osi pocisku, czyli tak zwana pełna stateczność żyroskopowa; oś pocisku przestaje zmieniać swe położenie wraz ze styżną i zachowuje na całej długości toru swój kierunek. Wskutek tego pocisk leci jak wskazano na rys. 35 i 36.

13. Tor pocisku w powietrzu

Lot pocisku w powietrzu - jak już wiemy - odbywa się przy działaniu dwóch sił: - siły ciężkości q i siły oporu powietrza R .

Pod działaniem siły ciężkości, pocisk na wznoszącej się części toru traci swą prędkość, natomiast na opadającej części toru prędkość jego wzrasta. Pod działaniem zaś siły oporu powietrza, pocisk traci swą prędkość na całej długości toru.

W rezultacie jednoczesnego działania sił q i R , prędkość pocisku na torze zmienia się następująco. Na części wznoszącej, siły q i R nadają pociskowi ujemne przyśpieszenie i prędkość pocisku szybko maleje. Na opadającej zaś części, siły q i R działają w przeciwnych kierunkach, prędkość pocisku nadal maleje do momentu, dopóki działanie sił nie zrównoważy się /punkt B rys. 49/. W punkcie B, w którym następuje zrównoważenie się sił, pocisk posiada najmniejszą prędkość.



Rys. 49. Tor pocisku w powietrzu /rzut na płaszczyznę strzelania.

Oddalenie punktu najmniejszej prędkości od wierzchołka toru zależy od kąta rzutu. Przy małych kątach rzutu oddalenie to jest na tyle duże, że niejednokrotnie punkt najmniejszej prędkości będzie się znajdował poniżej poziomu. Zwiększając kąt rzutu, przybliżamy jednocześnie punkt najmniejszej prędkości do wierzchołka toru i przy kącie rzutu $\epsilon = 90^\circ$ punkty te pokrywają się ze sobą. Po przejściu przez pocisk punktu B, prędkość pocisku pod działaniem siły q wzrasta i zazwyczaj osiąga wielkość bliską prędkości dźwięku, lecz zawsze pozostaje mniejszą od niej. Tak na przykład 100 mm pocisk na opadającej części toru osiąga swą największą prędkość równą około 330 m/sek.

Taka zmiana prędkości pocisku na torze określa ogólne właściwości toru w powietrzu, a mianowicie.

1. Tor pocisku jest krzywą niesymetryczną w stosunku do swego wierzchołka; wznosząca się część toru jest dłuższa i mniej stroma niż opadająca.
2. Dla punktów M_1 M_2 położonych na jednakowej wysokości $y_1 = y_2$, lecz na różnych częściach toru prędkości pocisku i kąty nachylenia stycznych są różne, a mianowicie $V_1 > V_2$ i wartość bezwzględna α_1 jest mniejsza od wartości bezwzględnej α_2 ($|\alpha_1| < |\alpha_2|$).
stąd prędkość końcowa pocisku V_k jest mniejsza od prędkości początkowej V_0 , a wartość bezwzględna kąta upadku jest większa od kąta rzutu ($|\eta| > |\epsilon|$).

3. Średnia prędkość pocisku na wznoszącej się części toru jest większa niż na opadającej w wyniku czego czas lotu pocisku od punktu wylotu do wierzchołka toru jest mniejszy, niż czas lotu pocisku od wierzchołka do punktu upadku.

Na przykład 100 mm pocisk przy kącie rzutu 7-50 do wierzchołka leci 34,5 sek, a od wierzchołka do punktu upadku 37,5 sek. Przy zwiększaniu kąta rzutu różnica czasów lotów pocisku do wierzchołka i od wierzchołka wzrasta.

4. Pionowy zasięg działa średnio, jest większy od połowy zasięgu poziomego. Zasięg pionowy współczesnych dział przeciwlotniczych osiąga ^{się} przy maksymalnym kącie podniesienia 59 - 76% całkowitej odległości poziomej.

5. Odległość strzelania i czas lotu pocisku zależy od prędkości początkowej pocisku i kąta rzutu, od kształtu kalibru i ciężaru pocisku oraz od warunków meteorologicznych.

6. Kąt rzutu ξ_m odpowiadający całkowitej maksymalnej odległości poziomej zależy od prędkości początkowej i współczynnika balistycznego. Tak na przykład:

- dla lekkiego pocisku karabinowego przy $V_0 = 800$ m/sek kąt rzutu $\xi_m \approx 35^\circ$,
- dla dział artylerii naziemnej średniego kalibru o prędkościach początkowych rzędu 550 - 600 m/sek. Kąt ten wynosi około 43° .
- dla współczesnych dział artylerii przeciwlotniczej o prędkościach początkowych 800 - 1000 m/sek - zbliżony jest do 45° .

Z dział dalekonośnych, u których pocisk osiąga prędkość początkową rzędu 1500 m/sek maksymalną całkowitą odległość otrzymujemy przy kącie rzutu około 55° .

14. Wykres torów. Izochrony i krzywe jednakowych nastaw zapalnika

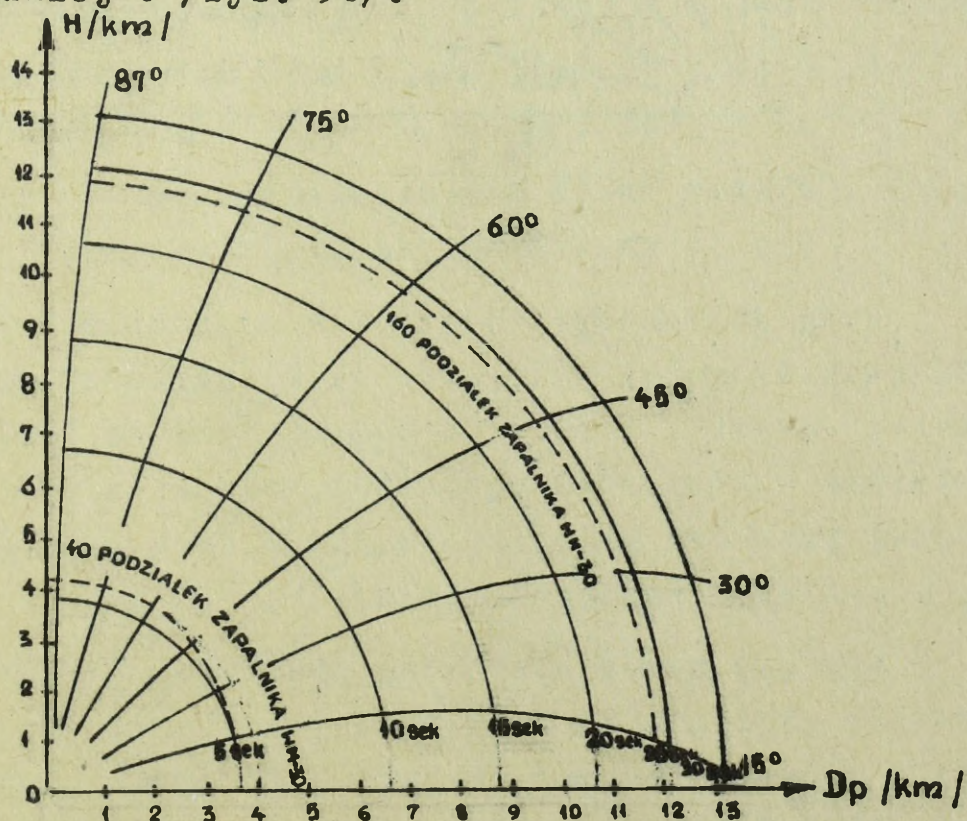
Właściwości balistyczne działa przeciwlotniczego najlepiej charakteryzuje tak zwany wykres torów. Składa

się on z wiązki torów z naniesionymi na nich izochronami i krzywymi jednakowych nastaw zapalnika.

Wiązką torów nazywamy szereg torów danego rodzaju pocisku, uzyskanych przy strzelaniu z określonego działa, przy jednakowych prędkościach początkowych pocisku $V_0 = \text{const}$ /, lecz przy różnych kątach rzutu /od najmniejszego do największego/. W rzeczywistości na wykres nanosimy nie całkowite tory /od punktu wylotu do punktu upadku/, lecz te odcinki, które wykorzystujemy przy strzelaniu do celów powietrznych.

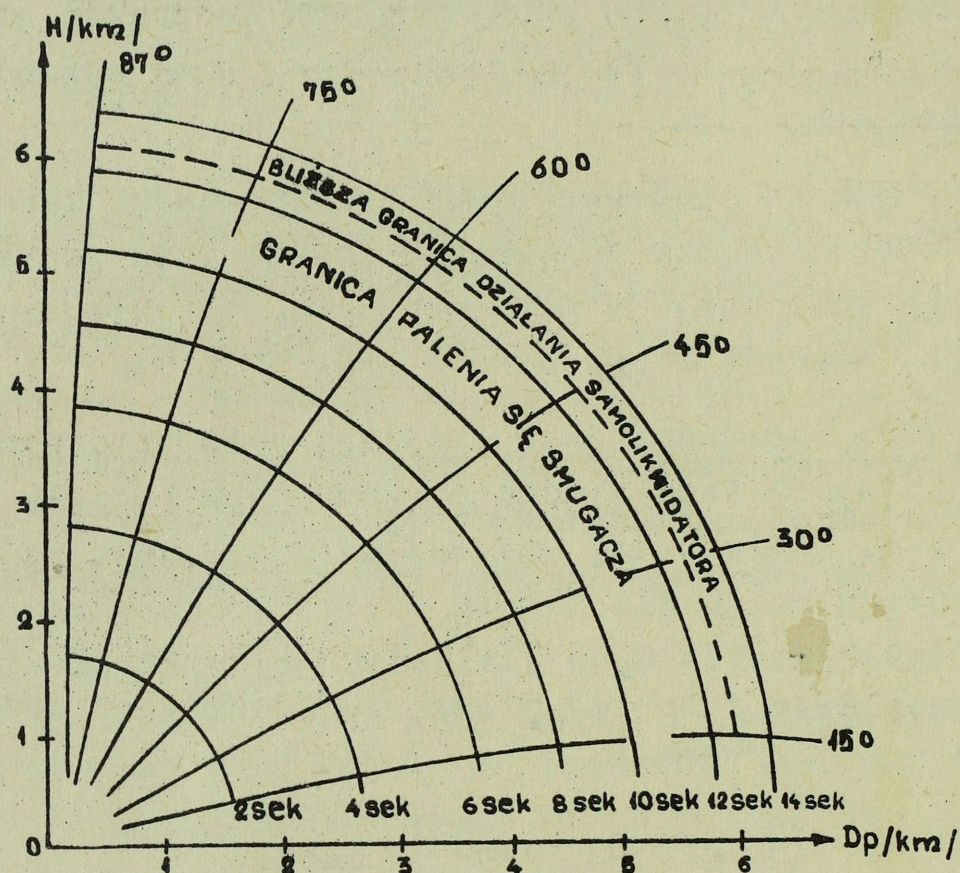
Jeżeli na poszczególnych torach wiązki zaznaczymy punkty odpowiadające jednakowym czasom lotu pocisku, a następnie połączymy je płynną krzywą, to otrzymamy szereg krzywych, zwanych izochronami /rys. 50 i 51/

Każda izochrona jest miejscem geometrycznym punktów odpowiadających temu samemu czasowi toru pocisku przy $V_0 = \text{const}$. Kształt tej krzywej zbliżony jest do łuku koła, wykreślonego dla małych odległości z punktu położonego powyżej punktu O, a dla dużych odległości - z punktu położonego poniżej O /rys. 50/.



Rys. 50. Wykres torów z naniesionymi na nich izochronami i krzywymi jednakowych nastaw zapalnika /izozapalnikowymi/ dla 100 mm armaty przeciwlotniczej i zapalnika WM-30.

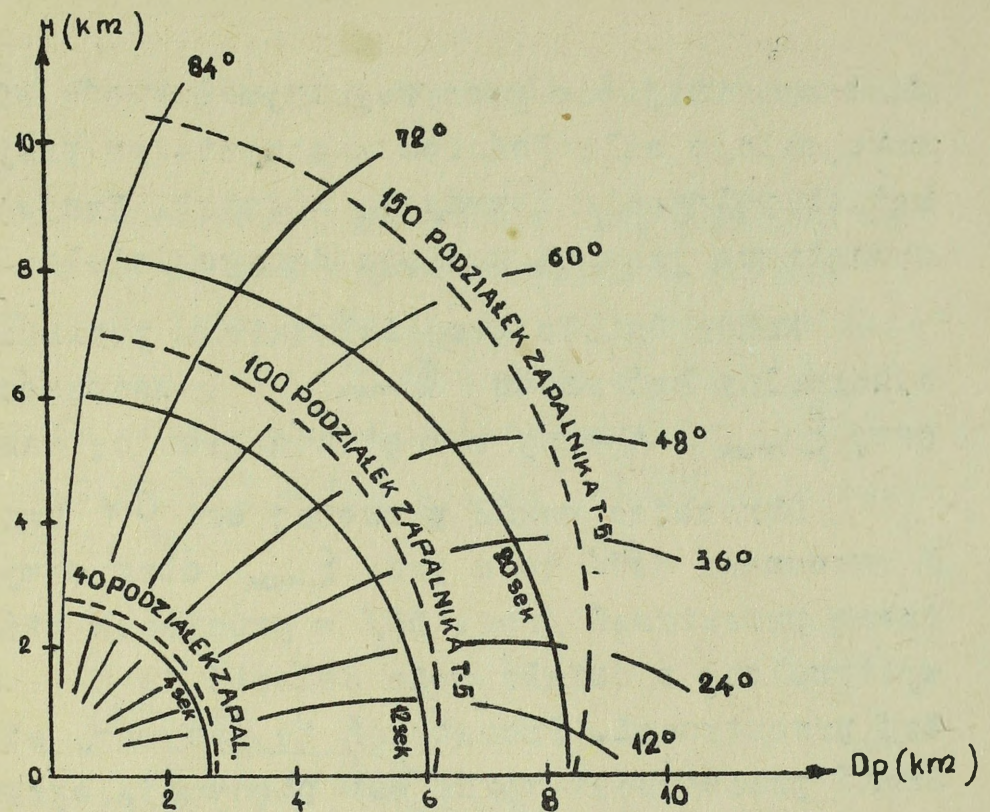
Krzywą równych nastaw zapalnika /izozapalnikowa/ nazywamy krzywą łączącą punkty na wiązce torów, odpowiadające jednakowym nastawom zapalnika dla torów utrzymanych przy $V_0 = \text{const}$. Krzywe te wykreślamy tak samo jak i izochrony. Charakter przebiegu izozapalnikowej dla zapalników mechanicznych jest taki sam, jak i izochrony, a dla zapalników prochowych krzywe te są bardziej uniesione w górę /rys. 50 i 52/.



Rys. 51. Wykres torów z naniesionymi na nie izochronami dla 57 mm armaty przeciwlotniczej.

Przy jednakowych nastawach zapalnika i zwiększaniu kąta podniesienia, odległość na której nastąpi rozprysk, również wzrasta. Uzasadnia się to tym, że gęstość powietrza ze wzrostem wysokości maleje, a tym samym ścieżki prochowe palą się wolniej, czas palenia zwiększa się i rozprysk następuje dalej.

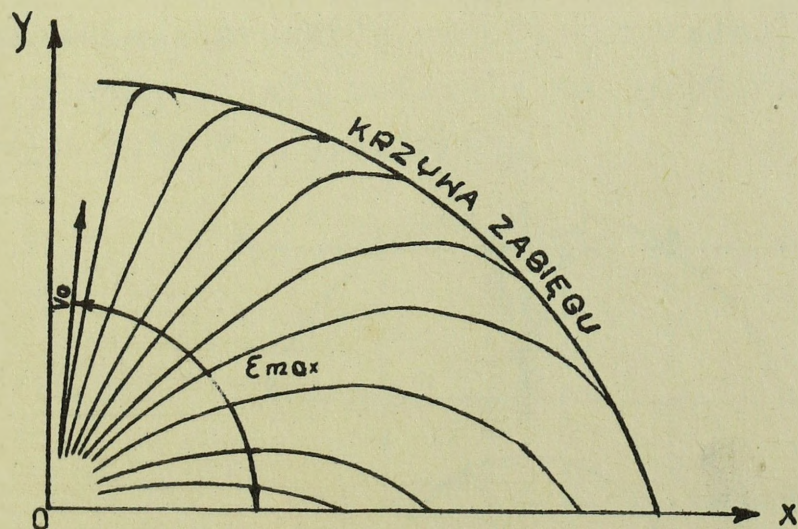
Wykresy torów sporządza się z reguły dla tabelarnych warunków strzelania. Przy pomocy wykresów torów, interpolując, możemy otrzymać nastawy kąta podniesienia i zapalnika, jak również czas lotu pocisku do dowolnego punktu w granicach zasięgu danego działka, jeżeli znane są współrzędne tego punktu.



Rys. 52. Izochrony i izepalnikowe zapalnika T-5 dla 85 mm armaty przeciwlotniczej.

15. Strefy dział przeciwlotniczych

Jeżeli wyznaczymy wiązkę całkowitych torów od punktu wylotu do punktu upadku i obwiedzimy ją płynną krzywą, to otrzymamy granicę, poza którą dane działo strzelać nie może /rys. 53/. Dlatego też skrzywą tę nazywamy krzywą zasięgu.



Rys. 53. Krzywa zasięgu.

Jest ona miejscem geometrycznym punktów odpowiadających maksymalnym odległościom rzeczywistym przy różnych kątach położenia i przy $V_0 = \text{const}$. Krzywa zasięgu jest zewnętrzną granicą zasięgu danego działka.

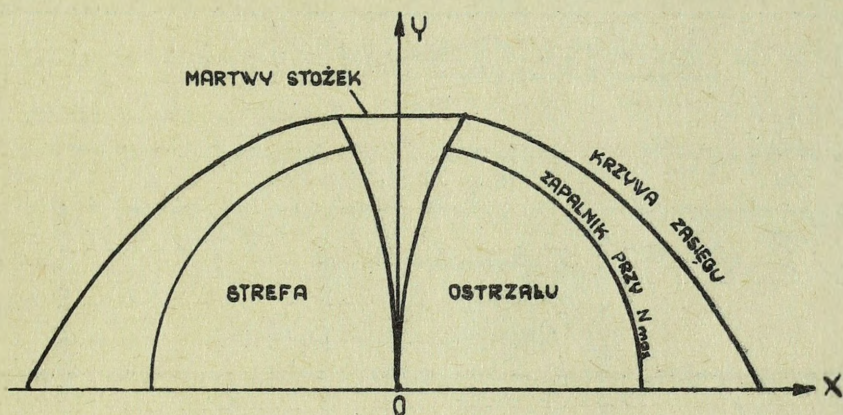
Każde działko przeciwlotnicze posiada pewien maksymalny kąt rzutu ξ_{\max} . Wznosząca część toru przy ξ_{\max} tworzy wewnętrzną granicę zasięgu działka.

Obracając wokół pionowej osi OY krzywą zasięgu i wznoszącą część toru przy ξ_{\max} otrzymamy pewną ograniczoną przestrzeń /rys. 54/ w granicach której pocisk wystrzelony z działka może dolecieć do danego punktu tej przestrzeni. Przestrzeń tę nazywamy strefą zasięgu. Część przestrzeni wokół osi pionowej, ograniczona płaszczyzną powstałą przy obrocie toru odpowiadającego największemu kątowi podniesienia, nazywamy martwym stożkiem. W obrębie martwego stożka prowadzenia strzelania z danego działka jest niemożliwe.

Praktycznie rzecz biorąc, przy strzelaniu artylerii przeciwlotniczej wykorzystuje się nie całą strefę zasięgu,

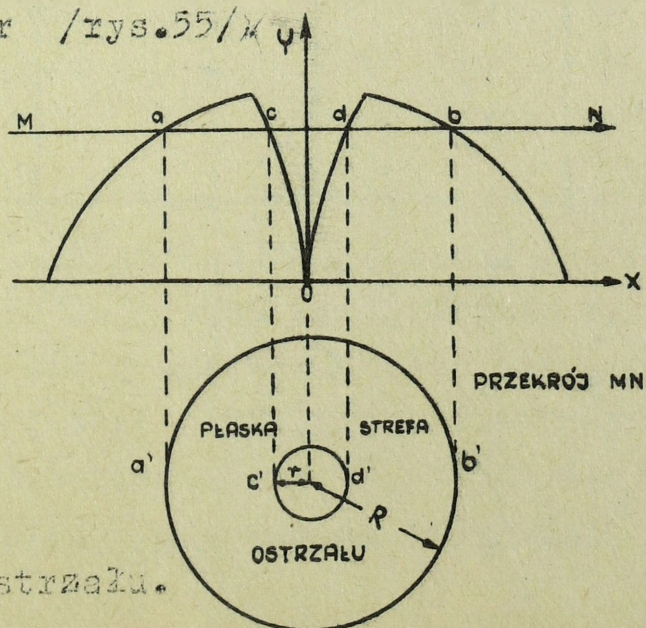
a tylko tę jej część, w której strzelanie do samolotów jest najbardziej skuteczne.

Jednym z najważniejszych czynników wpływających na skuteczność strzelania do celów powietrznych o dużych prędkościach jest czas lotu pocisku, im mniejszy ten czas tym skuteczniejsze strzelanie. Odpowiednio do tego czas działania zapalników czasowych ogranicza się. Tę część strefy zasięgu, w granicach której można uzyskać rozptysek nazywany strefą ostrzału /rys. 54/



Rys. 54. Strefa zasięgu i strefa ostrzału /przekrój pionowy.

Jeżeli przetniemy strefę ostrzału płaszczyzną poziomą na pewnej wysokości H , to na przekroju otrzymamy dwa kręgi: wewnętrzny będący przekrojem martwego stożka i zewnętrzny stanowiący przekrój strefy ostrzału. Przekrój taki nazywa się płaską strefą ostrzału na wysokości H . Promień mniejszego koła r /rys.55/



Rys. 55. Płaska strefa ostrzału.

nazywa się promieniem martwego stożka, α promień większego koła R - promieniem płaskiej strefy ostrzału.

Promień martwego stożka jest najmniejszą odległością poziomą, a promień płaskiej strefy ostrzału jest największą odległością poziomą, na której można strzelać przy danej wysokości. Im większa wysokość, tym większy będzie promień martwego stożka i mniejszy promień płaskiej strefy ostrzału. W ten sposób ze wzrostem wysokości zmniejsza się płaska strefa ostrzału /tabela 9/

Tabela 9

Wymiary płaskich stref ostrzału 85 mm i 100 mm armat przeciwlotniczych

Kaliber	100 mm		85 mm	
	Wysokość H / w m/	γ / w m/	R / w m/	R w m
		zapałnik WM-30		zapałnik T-5
1000	100	12700	100	9200
2000	150	12550	200	9200
3000	175	12350	300	9100
4000	200	12100	400	8900
5000	225	11800	600	8700
6000	250	11300	700	8200
7000	275	10650	800	7100
8000	400	9950	1000	5800
9000	425	9100	1200	3700
10000	475	6400	-	-
12000	600	4100	-	-
13000	850	-	-	-
14000	1000	-	-	-

Działa przeciwlotnicze małego kalibru prowadzą strzelanie uderzeniowe. Zapałniki uderzeniowe tych dział posiadają, dla zabezpieczenia przed porażeniem własnych wojsk, urządzenia samolikwidujące pocisk, gdy ten nie trafił w cel. Dlatego też bezpośrednie trafienie w cel możliwe jest tylko do momentu działania samolikwidatora.

A więc strefą ostrzału dla dział przeciwlotniczych małego kalibru będzie ta część strefy zasięgu, gdzie możliwe jest bezpośrednie trafienie w cel całym pociskiem. W ten sposób strefa ostrzału ma zewnętrzną granicę - krzywą maksymalnych odległości rzeczywistych, przy których następuje samolikwidacja pocisku.

Praktycznie krzywą tę możemy przyjąć za izochronę dla czasu lotu pocisku odpowiadającego samolikwidacji pocisku. Dla dział 37 mm czas ten przyjmuje się równy 10 sek., a dla 57 mm - 15 sek. Wewnętrzną granicę strefy stanowi również martwy stożek.

Znajomość wymiarów płaskich stref ostrzału dział artylerii przeciwlotniczej jest niezbędna dla szeregu praktycznych zadań a mianowicie przy planowaniu ugrupowania bojowego artylerii przeciwlotniczej, w zależności od wymaganej gęstości ognia przy obliczaniu ilości salw na określonej wysokości i kursie celu itd.

Tabela 10

Wymiary płaskich stref ostrzału dla 37 mm i 57 mm
armat przeciwlotniczych

Wysokość H w m	37 mm armata przeciwlotnicza		57 mm armata przeciwlotnicza	
	r	R	r	R
500	50	4300	25	6500
1000	100	4200	50	6500
1500	150	4000	75	6400
2000	200	3800	100	6200
2500	250	3400	125	6000
3000	300	3000	150	5800
3500	350	2300	175	5500
4000	400	1600	200	5200
4500	-	-	230	4700
5000	-	-	260	4200
5500	-	-	300	3600
6000	-	-	340	2500

16. Tabelaarne warunki strzelania

Przy strzelaniu z dział spotykamy się z szeregiem wielkości, określających czynniki toru danego pocisku. Takimi wielkościami są: kąt podniesienia, nastawa zapalnika czasowego, czas lotu pocisku, zboczenie itp.

Zbiór wielkości określających czynniki toru danego pocisku przy strzelaniu z działa nazywamy tabelami strzelniczymi.

Tabele strzelnicze powinny zawierać wszelkie dane niezbędne do rozwiązania szeregu zadań strzelania, jak również powinny być zestawione z wystracającą dla praktyki dokładnością. Oznacza to, że czynniki toru zawarte w tabelach powinny być jak najbardziej zbliżone do czynników występujących praktycznie przy strzelaniu.

Praktycznie strzelanie wykonuje się w różnorodnych warunkach, w tej czy innej mierze wpływających na lot pocisku, a tym samym na czynniki jego toru. W związku z tym przy zestawianiu tabel powinniśmy przyjąć pewne średnie warunki strzelania. Te określone warunki strzelania, dla których zestawia się tabele strzelnicze, nazywamy tabelarnymi lub normalnymi warunkami strzelania.

W zasadzie rzadko spotykamy się z normalnymi warunkami strzelania, dlatego też będziemy zmuszeni wprowadzać poprawki, co jednak jest znacznie prostsze, aniżeli korzystanie z dużej ilości tabel obliczonych dla różnych warunków strzelania, których może być nieskończenie wiele.

Warunki strzelania możemy podzielić na balistyczne i meteorologiczne. Do balistycznych warunków strzelania zaliczamy czynniki wynikające z właściwości balistycznych działa lub amunicji, na przykład: zużycie przewodów luf, balistyczne charakterystyki partii ładunków prochowych i zapalników, jak również ich temperatura, ciężar pocisku, zboczenie itd. Do meteorologicznych warunków strzelania zalicza się ciśnienie powietrza na poszczególnych wysokościach i jego temperaturę oraz kierunek i prędkość wiatru.

Jeżeli rozpatrzemy cały przebieg strzelania, to stwierdzimy, że oprócz wyżej wspomnianych warunków strzelania, jest szereg innych czynników wpływających na strzelanie, na przykład: oddalenie przyrządu określającego współrzędne celu od środka stanowiska ogniowego baterii, różnica wysokości stacji meteorologicznej i baterii, zmiana nastawy zapalnika w czasie ładowania itp. Te czynniki nie zależą bezpośrednio od balistyki działa.

Normalne warunki balistyczne

1. Prędkość początkowa pocisku V_0 - tabelarna tj. prędkość pocisku, którą przyjęto przy zestawianiu tabel strzelanizowanych, przy obliczaniu wykresów balistycznych, konoidów, potencjometrów balistycznych i celowników. Zazwyczaj jako prędkość tabelarną przyjmuje się prędkość początkową pocisku, odpowiadającą średnio zużytej lufie.
2. Temperatura ładunku $T_{\tau}^{\circ} = + 15^{\circ}\text{C}$
3. Ładunek normalny - zapewniający otrzymanie założonej konstrukcyjnie prędkości początkowej przy strzelaniu z nowej lufy.
4. Ciężar pocisku q - normalny.
5. Kształt i wymiary pocisku - zgodne z założeniami konstrukcyjnymi.
6. Czas działania zapalnika czasowego - zgodny z czasem działania wzorcowej partii zapalników.
7. Zboczenia nie ma.

Normalne warunki meteorologiczne

1. ciśnienie powietrza w punkcie stania działa

$$h_{0N} = 750 \text{ mm słupka rtęci.}$$

2. Temperatura powietrza $T_p^{\circ} = + 15^{\circ}\text{C}$
3. Prężność pary wodnej /przy względnej wilgotności powietrza 50%/ $e = 6,35 \text{ mm.}$
4. Gęstość, czyli ciężar 1 m^3 powietrza w punkcie stania działa $G_{0N} = 1,206 \text{ kg/m}^3.$
5. Prędkość rozchodzenia się dźwięku w punkcie stania działa $a_{0N} = 340,9 \text{ m/sek.}$
6. Pogoda bezwietrzna.

17. Tabele strzelnicze artylerii przeciwlotniczej

Tabele strzelnicze powinny zawierać wszystkie zasadnicze dane balistyczne dział, niezbędne dla strzelającego w jego praktycznej działalności. Przy pomocy tabel strzelniczych możemy znaleźć wielkości balistyczne dla określonego punktu /celu/ lub na odwrót, możemy znaleźć współrzędne geometryczne punktu /rozprysku/ według określonych wielkości balistycznych.

Tabele strzelnicze służą do przygotowania i przeprowadzenia bojowych i doświadczalnych strzelań, dane ich wykorzystuje się również przy sprawdzaniu balistycznych bloków przelicznika, przy badaniach teoretycznych i w szeregu innych przypadków.

Artyleria przeciwlotnicza nie tylko zwalca cele powietrzne, lecz może być również użyta do zwalczania celów naziemnych. Dlatego są dwa rodzaje tabel strzelniczych:

- 1/ tabele do strzelań powietrznych;
- 2/ tabele do strzelań naziemnych.

Treść i układ tabel strzelniczych

Przeznaczenie tabel określa ich treść, natomiast układ tabel powinien dawać możliwość nieskomplikowanego korzystania z nich, przy posługiwaniu się w wojskach.

Tabele do strzelań powietrznych składają się z czterech rozdziałów /części/.

Część pierwsza zawiera ogólne wiadomości; dane o działach i amunicji, tabele zmiany prędkości początkowej pocisku w zależności od wydłużenia komory naboju, tabelarne warunki strzelania oraz niektóre objaśnienia do tabel.

Część druga zawiera szereg tabel zwanych "tabelami balistycznymi". Z tabel balistycznych możemy uzyskać dane punktów leżących na przecięciu toru pocisku z izochronami lub krzywymi jednakowych nastaw zapalnika na podstawie danych wejściowych, którymi są: kąt podniesienia γ /przyjmuje się równy kątowi wzniesienia ϵ /ponieważ kąta podniesienia w artylerii przeciwlotniczej zwykle nie bierze się pod

uwagę/ i czas lotu pocisku t lub nastawa zapalnika z .
Kąty podniesienia podane są od 15° do wartości maksymalnej
co 15° , czas lotu pocisku co 2 sek, a nastawa zapalnika co
5 podziałek.

Załączona tabela 11 do 100 mm armaty przeciwlotni-
czej zawiera współrzędne torów: odległość poziomą i wy-
sokość, w zależności od kąta podniesienia φ i czasu lotu
pocisku t .

Według danych tabel można wykreślić pęk torów wraz
z izochronami. W tym celu na podstawie współrzędnych tabe-
larnych D_p i H наносimy na papierze w określonej skali szereg
punktów.

Tabela 11

Tabela współrzędnych torów w metrach w zależności od φ i t
 pocisk C-415, z zapalnikiem WM-30 przy strzelaniu 100 mm armaty,
 tabelarna prędkość początkowa - 880 m/sek, tabelarny ciężar pocisku 15,6 kg.

Kąt podnie- sienia	87°		75°		60°		45°		30°		15°		Kąt pod- niesieni
Czas lotu pocisku	Odległ. pozioma	wyso- kość	odległ. pozioma	wyso- kość	odległ. pozioma	wyso- kość	odległ. pozioma	wyso- kość	odległ. pozioma	wyso- kość	odległ. pozioma	wyso- kość	Czas lotu pocisku
	Dp	H	Dp	H	Dp	H	Dp	H	Dp	H	Dp	H	
	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	
2	87	1627	427	1572	823	1407	1163	1143	1423	801	1585	405	2
4	165	3044	807	2938	1555	2621	2193	2118	2677	1471	2975	823	4
6	236	4501	1154	4147	2220	3688	3122	2962	3801	2054	4209	969	6
8	302	5431	1475	5230	2833	4633	3974	3697	4821	2508	5317	1152	8
10	364	6455	1776	6209	3406	5482	4764	4341	5757	2904	6320	1281	10
12	423	7390	2061	7098	3943	6242	5501	4905	6621	3233	7233	1461	12
14	479	8246	2334	7910	4458	6927	6196	5393	7426	3501	8071	1597	14
16	533	9032	2596	8652	4949	7544	6855	5828	8181	3714	8844	1592	16
18	585	9752	2849	9331	5421	8099	7483	6199	8891	3877	9562	1350	18
20	636	10413	3094	9952	5877	8597	8086	6517	9565	3994	10236	1272	20
22	686	11024	3335	10521	6321	9042	8667	6786	10209	4066	10875	1160	22
24	735	11589	3571	11041	6755	9440	9232	7007	10830	4098	11486	1014	24
26	784	12109	3805	11516	7183	9783	9786	7185	11433	4090	12078	835	26
28	832	12587	4037	11950	7606	10104	10331	7322	12023	4043	12650	623	28
30	880	13023	4268	12324	8026	10372	10868	7418	12600	3958	13205	378	30

Tabela uchyień współrzędnych toru przy zmniejszeniu prędkości początkowej o 10%; 100 mm armata przeciwlotnicza; pocisk C-415; zapalniki WM-45, WM-30.

podniesie- nie	87°		75°		60°		45°		30°		15°		Kąt podniesie- nia
	odl. poz.	wyso- kość	odl. poz.	wyso- kość	odl. poz.	wyso- kość	odl. poz.	wyso- kość	odl. poz.	wyso- kość	odl. poz.	wyso- kość	
skw													czas lotu pocisku
t										H	Dp	H	t
sek.	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	sek.
2	- 8	- 162	- 43	- 151	- 80	- 136	-115	- 114	- 139	- 80	- 155	- 40	2
4	-15	- 302	- 79	- 287	-149	- 260	-216	- 212	- 259	-151	- 287	- 75	4
6	-22	- 433	-112	- 414	-214	- 371	-306	- 299	- 366	-209	- 402	-107	6
8	-30	- 557	-143	- 533	-275	- 474	-388	- 379	- 463	-263	- 503	-135	8
10	-37	- 673	-173	- 651	-332	- 572	-464	- 454	- 552	-314	- 594	-160	10
12	-43	- 788	-202	- 762	-386	- 666	-533	- 525	- 634	-362	- 677	-183	12
14	-48	- 897	-230	- 868	-437	- 756	- 601	- 593	- 709	-407	- 751	-205	14
16	-53	-1002	-257	- 969	-486	- 842	-663	- 657	- 778	-448	- 816	-227	16
18	-57	-1103	-283	-1065	-532	- 924	-721	- 718	- 842	-486	- 872	-248	18
20	-60	-1200	-308	-1156	-573	-1002	-774	- 775	- 899	-521	- 921	-268	20
22	-63	-1293	-331	-1243	-613	-1074	-822	- 829	- 949	-554	- 960	-286	22
24	-67	-1382	-352	-1326	-652	-1143	-865	- 880	- 991	-585	- 990	-304	24
26	-71	-1467	-372	-1406	-687	-1209	-903	- 929	-1023	-614	-1011	-322	26
28	-74	-1548	-392	-1484	-720	-1272	-937	- 979	-1052	-624	-1029	-339	28
30	-78	-1629	-412	-1561	-751	-1333	-968	-1021	-1075	-669	-1046	-356	30

Zasadnicza tabela strzelnicza
100 mm armata przeciwlotnicza; pocisk C-415; zapalniki: WM-45, WM-30

Wysokość 8000 m

Odległość pozioma	Kąt położenia	Kąt celownika	Zboczenie	Czas lotu pocisku	Nastawa zapalnika WM-30, WM-45		Kąt nachylenia stycznej	Prędkość lotu	Odległość rzeczywista
Dp	p	e	Z	t	z			V	D
m	tys.	tys.	tys.	sek.	podz.	podz.	stopnie	m/sek	m
200	1476	2	2	13,4	89	61	88,4	428	8002
400	1452	4	2	13,4	89	61	86,8	428	8010
600	1428	6	2	13,4	89	61	85,1	427	8022
800	1405	8	2	13,5	90	61	83,5	426	8040
1000	1381	10	2	13,5	90	61	81,9	425	8064
1500	1323	15	2	13,7	91	62	77,9	421	8139
2000	1266	20	2	14,0	93	63	73,9	417	8246
2500	1211	26	2	14,3	95	65	69,9	411	8381
3000	1157	32	2	14,7	98	67	66,0	404	8544
3500	1106	38	2	15,2	101	68	62,3	396	8732
4000	1057	44	2	15,8	104	70	58,6	388	8944
4500	1011	50	3	16,4	108	73	55,0	379	9179
5000	967	57	3	17,1	112	76	51,5	369	9334
5500	925	64	3	17,9	117	79	48,0	358	9708
6000	885	72	3	18,8	122	83	44,5	347	10000
6500	848	80	3	19,7	128	86	41,0	336	10308
7000	813	89	4	20,7	134	90	37,5	326	10630
7500	781	99	4	21,8	140	95	34,1	316	10966
8000	750	109	4	23,0	147	99	30,6	306	11314
8500	721	120	4	24,3	155	104	27,0	296	11673
9000	694	132	5	25,7	163	110	23,3	288	12042
9500	668	144	5	27,1	172	115	19,6	281	12420
10000	644	157	6	28,6	181	121	15,8	275	12807
10000	600	188	7	31,9	-	135	7,7	264	13604
30000	527	266	11	40,0	-	166	9,4	254	15264
37600	503	303	13	43,8	-	181	16,7	256	15916

Punkty odpowiadające jednakowym kątom podniesienia, połączone płynną krzywą dadzą nam tor, zaś odpowiadające jednakowym czasem lotu pocisku - izochronę.

Oprócz tego mamy tabele, które różnią się od tabeli 10 tylko tym, że danymi wejściowymi do niej są takie wielkości jak: kąt podniesienia φ i nastawa zapalnika Z.

Przy pomocy tych tabel możemy wykreślić pęk torów wraz z izozapalnikami.

Pozostałe tabele balistyczne posiadają taki sam układ, czyli danymi wejściowymi są φ i t. Podają następujące wielkości: 1/ zbieżenie, 2/ prędkość pocisku, 3/ kąt nachylenia stycznej do toru, 4/ odchylenie współrzędnych torów spowodowane niezgodnością warunków strzelania z warunkami tabelarnymi, 5/ charakterystyki rozrzutu poszczególnych dział przy strzelaniu bez przelicznika /tabela 11/.

Część trzecia zawiera tak zwane zasadnicze tabele strzelania i tabele poprawek współrzędnych dla punktów wyznaczonych w prostokątnym układzie współrzędnych. Danymi wejściowymi do tych tabel są: wysokość H i odległość pozioma Dp. Przykładem takich tabel mogą być tabele 12 i 13.

Część czwarta zawiera:

1. Wykres /pęk/ torów wraz z krzywymi jednakowych nastaw zapalnika /izozapalnikowymi/.
2. Wykres /pęk/ torów wraz z izochronami.
3. Wykres zasięgu pocisku przedstawiający pęk całkowitych torów./od punktu wylotu do punktu upadku/ wraz z niektórymi izochronami dla wznoszących i opadających części toru.

W tabelach strzelniczych dla 57 mm i 100 mm armat przyjęto:

1. Wartości bezwzględne poprawek i odchyłek są równe, a znaki przeciwne.

Tabela poprawek współrzędnych, pocisk O-415; 100 mm armata przeciwlotnicza. Zapalniki: WM-45, WM-30.

Odległość pozioma	poprawki												Odległość pozioma
	na różnicę						na wiatr						
	prędkości początkowej o + 1%		gęstości powietrza o + 1%		Temperatura powietrza o + 10°C		ciężaru pocisku o jeden znak /+2/3%/		czołowy o prędkości 10 m/sek.		boczny o prędkości 10 m/sek.		
odległość	wysokości	odległość	wysokości	odległość	wysokości	odległość	wysokości	odległość	wysokości	kierunku			
m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	m	tys.	m
500	- 5	-36	+ 1	+21	+ 2	+18	- 1	- 1	+32	+ 1	35	70	500
1000	-10	-36	+ 3	+22	+ 3	+18	- 1	- 3	+34	+ 2	35	35	1000
1500	-15	-36	+ 4	+22	+ 3	+18	- 1	- 3	+36	+ 3	36	24	1500
2000	-20	-37	+ 6	+23	+ 4	+18	- 1	- 4	+38	+ 4	37	18	2000
2500	-25	-38	+ 7	+23	+ 5	+19	- 1	- 4	+40	+ 5	38	15	2500
3000	-30	-38	+9	+24	+ 6	+19	- 2	- 4	+43	+ 6	40	14	3000
3500	-35	-38	+10	+24	+ 7	+19	- 2	- 4	+43	+ 7	42	13	3500
4000	-40	-39	+12	+25	+ 9	+20	- 2	- 4	+43	+ 9	45	11	4000
4500	-44	-39	+14	+26	+10	+20	- 2	- 4	+53	+10	48	10	4500
5000	-49	-90	+16	+27	+12	+21	- 3	- 5	+37	+12	51	9	5000
5500	-53	-91	+18	+28	+13	+22	- 4	- 6	+62	+13	55	9	5500
6000	-58	-92	+20	+29	+15	+23	- 5	- 7	+68	+14	59	9	6000
6500	-63	-93	+22	+30	+16	+24	- 6	- 8	+75	+15	63	10	6500
7000	-68	-94	+24	+31	+18	+25	- 7	- 9	+82	+16	70	10	7000
7500	-72	-95	+26	+32	+19	+26	- 8	- 9	+90	+17	76	10	7500
8000	-76	-97	+29	+33	+20	+27	-10	-10	+98	+18	82	10	8000
8500	-80	-99	+31	+35	+20	+28	-11	-11	+107	+20	89	10	8500
9000	-84	-101	+33	+36	+20	+29	-12	-12	+117	+21	97	10	9000
9500	-88	-103	+35	+38	+19	+29	-13	-13	+128	+22	105	11	9500
10000	-91	-106	+37	+39	+19	+30	-15	-14	+140	+24	114	11	10000

2. Wielkości poprawek i odchyłek są proporcjonalne do tych czynników, które je powodują.
3. Wartości bezwzględne poprawek i odchyłek nie zależą od znaku czynnika, który je wywołał.

Tabele do strzelań naziemnych składają się z trzech części.

Część pierwsza zawiera podstawowe wskazówki co do wykorzystania tabel, ogólne dane o działale i amunicji oraz tabelarne warunki strzelania.

Część druga, to właściwe strzelnicze tabele. Tabele te zestawia się osobno dla poszczególnych rodzajów pocisków i wzorów zapalnika, dla danego działła. Wejściową wielkością jest tu odległość rzeczywista, brana co 200 m. Wszystkie wielkości zawarte w tabelach możemy podzielić na 3 grupy: 1/ Zasadnicze wielkości balistyczne określające czynniki toru przy strzelaniu do celów naziemnych. 2/ Poprawki na odchyłki warunków strzelania od normalnych. 3/ Charakterystyki rozrzutu.

Do zasadniczych charakterystyk balistycznych zaliczamy nastawę celownika C , nastawę zapalnika czasowego Z , wysokość toru Y , zmianę odległości upadku przy zmianie kąta celownika o 1 tysięczną $\Delta X_{tys.}$, zmianę wysokości rozprysku przy zmianie nastawy zapalnika o 1 podziałkę ΔY_z , kąt upadku ω , prędkość końcową V_k i czas lotu pocisku t .

Poprawki podane są: na zboczenie Z , na wiatr boczny ΔZ_w i wydłużony ΔX_w , na odchyłkę ciśnienia powietrza ΔX_h , temperatury powietrza ΔX_T , temperatury ładunku ΔX_{TLC} , prędkości początkowej ΔX_{V_0} i ciężaru pocisku ΔX_q .

Dla strzelania uderzeniowego charakterystyki rozrzutu podane są jako uchYLENIA ŚRODKOWE punktów upadku: w głąb U_g , wwyż U_w i wszerz U_s , dla strzelania rozpryskowego uchYLENIA ŚRODKOWE podane są dla tych samych kierunków $/U_{g_r}, U_{w_r}$ i $U_s/$

W części trzeciej podane są tabele pomocnicze, takie jak: tabele tangensów i sinusów kątów, tabele zamiany tysięcznych na stopnie i minuty oraz tabele do rozkładania wiatru balistycznego na składowe.

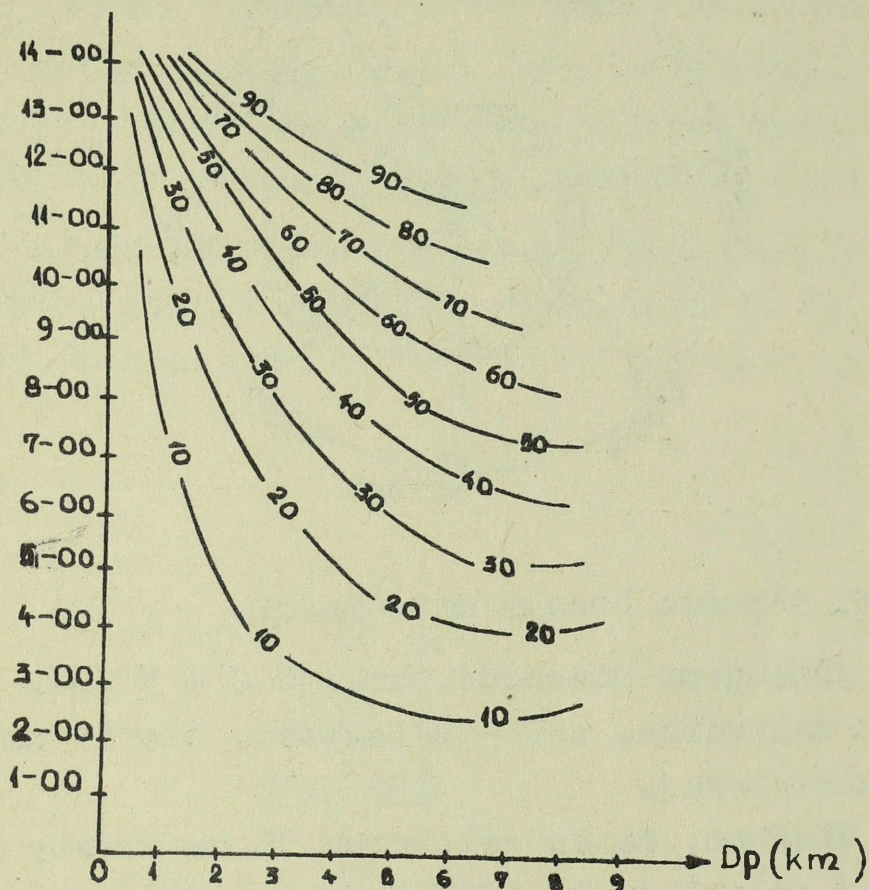
Tabele strzelnicze małokalibrowej artylerii przeciwlotniczej zbudowane są tak samo, jak i średnio-kalibrowej, z tym, że nie posiadają danych dotyczących strzelania rozpryskowego.

Określanie nastaw działa i zapalnika przy strzelaniu do celów powietrznych.

Tabele strzelnicze pozwalają nam na znalezienie niezbędnych wielkości balistycznych dla ograniczonej ilości punktów, odpowiadających wejściowym danym. Dla pozostałych punktów odnajdujemy te wartości na drodze interpolacji, co związane jest ze stratą czasu. Przy strzelaniu artylerii przeciwlotniczej niezbędne jest otrzymywanie danych natychmiastowe i ciągłe. Oprócz tego przy wykorzystaniu przeliczników i automatycznych celowników spotykamy się z koniecznością otrzymania tych wielkości w postaci liniowego lub kąтового przesunięcia odpowiednich mechanizmów lub zmiany napięcia elektrycznego. W związku z powyższym, w artylerii przeciwlotniczej stosuje się, dla ciągłego otrzymywania danych balistycznych szereg urządzeń takich, jak: wykresy balistyczne, konoidy, mimośrodory lub potencjometry.

Wszystkie te urządzenia w zasadzie są niczym innym, jak tabelami strzelniczymi przedstawionymi w dogodnej do korzystania formie.

Wykresy balistyczne sporządza się w prostokątnym układzie współrzędnych i stanowią one szereg krzywych izowysokościowych, tej lub innej wielkości balistycznej, wykreślonych dla różnych wysokości /rys. 56/



Rys. 56. Wykres kąta podniesienia.

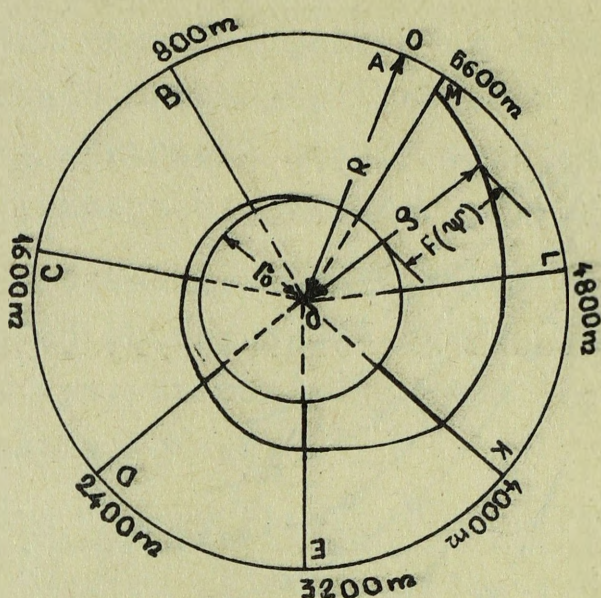
Mimośrodzy balistyczne stosuje się przy określaniu funkcji balistycznej jednego argumentu, na przykład kąta celownika jako funkcji odległości strzelania.

Zależność ta w biegunowym układzie współrzędnych ma postać:

$$= +$$

gdzie:

- promień - wektor,
- promień początkowy,
- kąt biegunowy, proporcjonalny do argumentu,
- wielkość liniowa, proporcjonalna do określonej wielkości.



Rys. 57. Schemat budowy mimośrod.

Zbudujemy mimośród funkcji $C = F / D /$, gdzie C - kąt celownika, a D - odległość, dla 57 mm armaty przeciwlotniczej.

Wiadomo, że na celowniku 57 mm armaty możemy nastawić odległość do 5600 m. W związku z tym bierzemy szereg argumentów /odległości/ w granicach od 0 do 5600/ oo 800 m/, dla których kąty celownika /C/ wzięte z tabel strzelniczych do strzelań naziemnych są następujące:

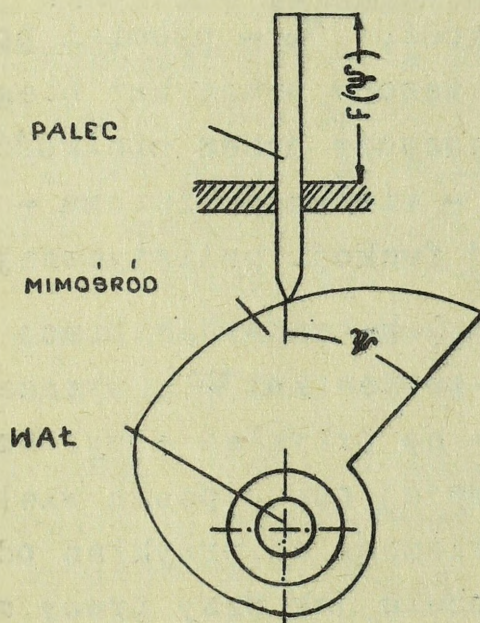
D/m/	0	8	16	24	32	40	48	56
C/tys./	0	5	10	18	27	39	56	78

Ustalamy wielkość promienia początkowego i skalę liniową kąta celownika, następnie wykreślamy dwa koncentryczne koła - mniejsze o promieniu \tilde{C}_0 i większe o promieniu R , który powinien być większy niż maksymalna wartość β /w naszym przykładzie R powinno być większe od $\tilde{C}_0 + 78 M$, gdzie M liniowa skala kąta celownika/. Przyjmujemy, że zmianie odległości o 800 m odpowiada obrót mimośrod wokół swej osi o kąt 50° i ze środka O wykreślamy promienie OA , OB , OC itd.
/rys.57/.

Następnie od środka O , wzdłuż promieni odłożymy wielkości odpowiadające danym odległościom:

$\rho_0 = r_0 + 0$; $\rho_1 = r_0 + 5M$; $\rho_2 = r_0 + 10M$ /patrz powyższa tabelka/,
gdzie M przyjęta liniowa skala kąta celownika.
Łącząc punkty otrzymane na poszczególnych promieniach płynną krzywą, otrzymamy profil szukanego mimośrod.

Mimośród osadza się na wale /rys. 58/, wraz z którym obraca się on o pewien określony kąt ψ , a mimośród opiera się o czujnik, przyślinkany sprężyną.



Rys. 58. Schemat działania mimośrod.

Przy obrocie mimośrodów o wielkość argumentu /kąta Ψ /, palec wysunie się o wartość funkcji. Ten liniowy ruch zostaje przekazany do odpowiedniego mechanizmu przelicznika lub automatycznego celownika.

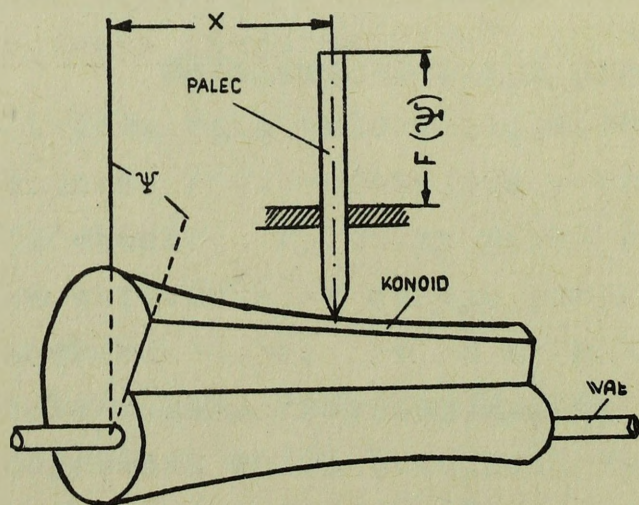
Konoidy umożliwiają otrzymanie funkcji balistycznych dwóch zmiennych argumentów na przykład kąta podniesienia w zależności od wysokości i odległości poziomej.

Konoid stanowi jak gdyby zespół mimośrodków, osadzonych na wspólnej osi /rys. 59/ i wyraża zależność funkcyjną.

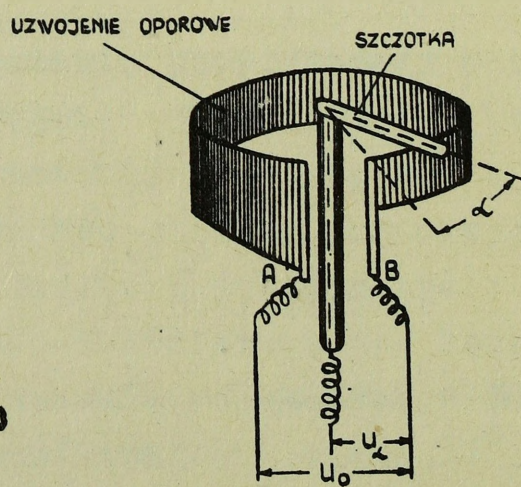
gdzie: U - szukana wielkość, r_0 - promień początkowy, Ψ - argument wyznaczony przez kąt biegunowy, x - argument wyznaczony przez wielkość liniową przesunięcia i F - wielkość liniową - proporcjonalna do określonej funkcji balistycznej,

Praca konoidu jest taka sama jak praca mimośrodu, z tym, że oprócz obrotu o pewien kąt Ψ , wyrażający jedną ze zmiennych niezależnych - na przykład - wysokość, przesuwa się on jeszcze wzdłuż swojej osi o pewną wielkość x , wyrażającą drugą zmienną niezależną, na przykład odległość poziomą. Szukaną wielkość U , podobnie jak przy pracy mimośrodu, otrzymujemy w postaci liniowego przesunięcia się ozujnika.

Obliczanie konoidu polega więc na obliczeniu szeregu mimośrodków dla poszczególnych wartości x .



Rys. 59. Schemat działania konoidu.



Rys. 60. Schemat potencjometru balistycznego.

Potencjometry są to najprostsze urządzenia elektryczne, wyrażające zależność dwóch wielkości. Potencjometry są to oporniki składające się ze szkieletu, uzwojenia oporowego i szczotki przesuwającej się wzdłuż uzwojenia.

Na końcówki uzwojenia A i B /rys. 60/ podaje się napięcie U_0 określonej wielkości; napięcie U_x na wyjściu, zdejmujemy ze szczotki pomiędzy punktem, w którym styka się szczotka z uzwojeniem a jednym z jej końców. Wielkość napięcia na wyjściu zależy od odległości Δ między szczotką i punktem B; ze wzrostem tej odległości opór uzwojenia wzrasta, a napięcie na wyjściu maleje.

Potencjometry balistyczne obliczone są w ten sposób, że wielkość przesunięcia się szczotki Δ jest proporcjonalna do wielkości jednego z argumentów /najczęściej H i Dp/, a na wyjściu otrzymujemy napięcie proporcjonalne do tej funkcji balistycznej, dla wypracowania której dany potencjometr jest przeznaczony. W zasadzie wielkości balistyczne zmieniają się nierównomiernie, a więc i uzwojenia potencjometru balistycznego powinny być również nierównomierne i konstrukcja ich powinna odpowiadać charakterowi zmiany wypracowywanej wielkości balistycznej.

We współczesnych przelicznikach stosuje się pierścieniowe potencjometry balistyczne, połączone w zespoły pozwalające na wypracowanie funkcji balistycznych dwóch argumentów /zwykle od H i Dp lub D i p/. Przy pomocy opisanych urządzeń wypracowywane są zasadnicze wielkości balistyczne / φ , t , Z /, jak również poprawki na odchyłki warunków strzelania od normalnych.

18. Warunki wpływające na lot pocisku i na położenie rozprysku

Jak już wspominaliśmy, tabele strzelnicze sporządza się dla pewnych określonych warunków strzelania, które nazwaliśmy normalnymi lub tabelarnymi. Na podstawie tabel strzelniczych sporządza się wykresy balistyczne, mimośrodowy, kątowy i potencjometry, które również odpowiadają tymże warunkom normalnym. Jednak warunki faktyczne, w których

przeprowadza się strzelanie, mniej lub więcej różnią się od normalnych, dlatego przy strzelaniu zmuszeni jesteśmy stosować poprawki. Aby ustalić zasady wprowadzenia poprawek, powinniśmy rozpatrzyć jakie warunki i w jaki sposób wpływają na lot pocisku i położenia rozprysku.

Uchylenie się rozprysku od tabelarnego punktu może nastąpić w dwóch przyczyn: 1/ dlatego, że zmienił się tor pocisku; 2/ dlatego, że zmienił się czas działania zapalnika czasowego.

Do przyczyn zmieniających tor pocisku zaliczamy:

- odchyłkę prędkości początkowej pocisku od tabelarnej / ΔV_0 /;
- odchyłkę gęstości powietrza / ΔG /;
- odchyłkę ciężaru pocisku od tabelarnego / Δq /;
- wiatr /W/.

Czas działania prochowego zapalnika czasowego zależy od prędkości palenia się ścieżki prochowej, a czas palenia - od tej temperatury i ciśnienia powietrza wewnątrz zapalnika.

Czas działania mechanicznych zapalników czasowych może odchyłać się w granicach tolerancji, nieuniknionych przy seryjnej produkcji. Czas działania mechanicznych zapalników w małym tylko stopniu zależy od ich temperatury.

19. Wpływ odchyłki prędkości początkowej na lot pocisku i położenie rozprysku.

Prędkość początkowa pocisku V_0 jest zasadniczym wskaźnikiem balistycznym działa. Wielkość jej dla pocisku o danym ciężarze zależy od ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy, w szczególności od prędkości narastania tego ciśnienia oraz średniej jego wartości. Im prędzej narasta ciśnienie i im większa jest jego średnia wartość, tym z większą prędkością pocisk zostaje wystrzelony. Prędkość narastania ciśnienia jest bezpośrednio zależna od prędkości palenia się prochu, a ta z kolei zależy od temperatury ładunku i od ciśnienia początkowego, tj. tego ciśnienia, które kształtuje się w komorze ładunkowej w momencie zapalenia się prochu.

Oprócz tego w skrzyni z nabojami umieszcza się metrykę danej partii ładunków, w której podana jest odchyłka prędkości początkowej pocisku odpowiadająca danej partii ładunków.

Ustalmy z kolei w jaki sposób wpływa zmiana prędkości początkowej na lot pocisku i położenie rozprysku. W tym celu założymy, że lot pocisku odbywa się w próżni i rozpatrzmy trzy przypadki lotu pocisku:

- 1/ przy tabelarnej prędkości początkowej V_0
- 2/ przy prędkości początkowej $V_0 = V_0 + \Delta V_0$
- 3/ przy prędkości początkowej $V_0 = V_0 - \Delta V_0$

Wartości czasu lotu pocisku i kąta rzutu dla poszczególnych przypadków są jednakowe /rys. 61/.

Pocisk posiadający tabelarną prędkość początkową V_0 , gdyby na niego nie działała siła ciężenia, poruszał-by się po linii rzutu i po upływie czasu t przebyłby odcinek

$L = V_0 \cdot t$ i znalazłby się w punkcie N. Ponieważ na pocisk działa siła ciężenia, nadająca mu przyspieszenie g , to pocisk obniżywszy się względem linii rzutu o wielkość $\frac{g \cdot t^2}{2}$ znajdzie się w punkcie M.

Drugi pocisk o prędkości początkowej większej od tabelarnej $V_0 = V_0 + \Delta V_0$ w tym samym czasie przeleci odcinek $L' = (V_0 + \Delta V_0) \cdot t$, obniży się o tę samą wielkość i znajdzie się w punkcie M' położonym dalej i wyżej niż punkt M.

Trzeci pocisk posiadający prędkość początkową mniejszą od tabelarnej $V_0 = V_0 - \Delta V_0$ przeleci odcinek $L'' = (V_0 - \Delta V_0) \cdot t$, obniży się o wielkość $\frac{g \cdot t^2}{2}$ i znajdzie się w punkcie M'' położonym bliżej i niżej od punktu M.

W myśl założenia, czas lotu t dla wszystkich trzech pocisków jest jednakowy, a więc obniżenia tych pocisków będą sobie równe, tym samym linia łącząca punkty M', M i M'' będzie prostą równoległą do linii rzutu.

W ten sposób stwierdzamy, że przy strzelaniu w próżni, odchyłka prędkości początkowej od jej wartości tabelarnej spowodowałoby odchylenie się rozprysku wzdłuż linii równoległej do linii rzutu.

Przy strzelaniu w realnych warunkach obniżenia pocisków względem punktów N' , N i N'' właściwie nie będą dokładnie jednakowe, lecz różnica będzie tak nieznaczna, że można jej nie uwzględniać, a przyjąć, że odchyłka prędkości początkowej, przy strzelaniu w realnych warunkach, wpływa na lot pocisku i położenie rozprysku, tak samo jak i przy strzelaniu w próżni.

Rozprysk uchyli się praktycznie od tabelarnego punktu wzdłuż linii równoległej do linii rzutu i jeżeli prędkość początkowa pocisku jest większa od tabelarnej, rozprysk nastąpi dalej i wyżej, jeżeli mniejsza - niżej i bliżej.

20. Wpływ odchyłki gęstości powietrza na lot pocisku i położenia rozprysku

Jak wiadomo, gęstość powietrzna jest jednym z głównych czynników określających siłę oporu powietrza, im większa gęstość powietrza, tym większa jego siła oporu i odwrotnie. Siła oporu powietrza z kolei oddziałuje na prędkość lotu pocisku, w miarę zwiększania się siły oporu powietrza wzrasta /wartość bezwzględna/ ujemne przyspieszenie tej siły - jak tym samym pocisk szybciej traci swoją prędkość lotu.

Po przeprowadzeniu szeregu doświadczeń ustalono, że wpływ odchyłki gęstości powietrza na lot pocisku i położenie rozprysku wyraża się następująco:

1. Przy zwiększeniu gęstości powietrza tor pocisku przebiega wszystkimi swoimi punktami poniżej toru tabelarnego, a przy zmniejszeniu gęstości tor będzie przebiegał powyżej toru tabelarnego.
2. Przy zwiększeniu gęstości powietrza rozprysk nastąpi niżej i bliżej aniżeli przy tabelarnej gęstości, a przy zmniejszeniu gęstości - wyżej i dalej.
3. Przesunięcie się rozprysku spowodowane odchyłką gęstości powietrza odbywa się wzdłuż prostej, którą praktycznie przyjmuje się jako równoległą do linii rzutu.

Z tego wynika, że odchyłka gęstości powietrza od wartości tabelarnej / ΔG / wpływa na lot pocisku i położenie rozprysku prawie tak samo, jak odchyłka prędkości początkowej / ΔV_0 /. Umożliwia to w razie potrzeby łączne uwzględnienie odchyłek gęstości powietrza i prędkości początkowej w postaci jednej poprawki.

W miarę zmiany wysokości, gęstość powietrza zmienia się i to komplikuje jej uwzględnienie. W związku z tym w praktyce zamiast faktycznej odchyłki gęstości powietrza uwzględnia się tak zwaną balistyczną odchyłkę gęstości powietrza.

21. Wpływ zmiany prężności powietrza na lot pocisku i położenia rozprysku.

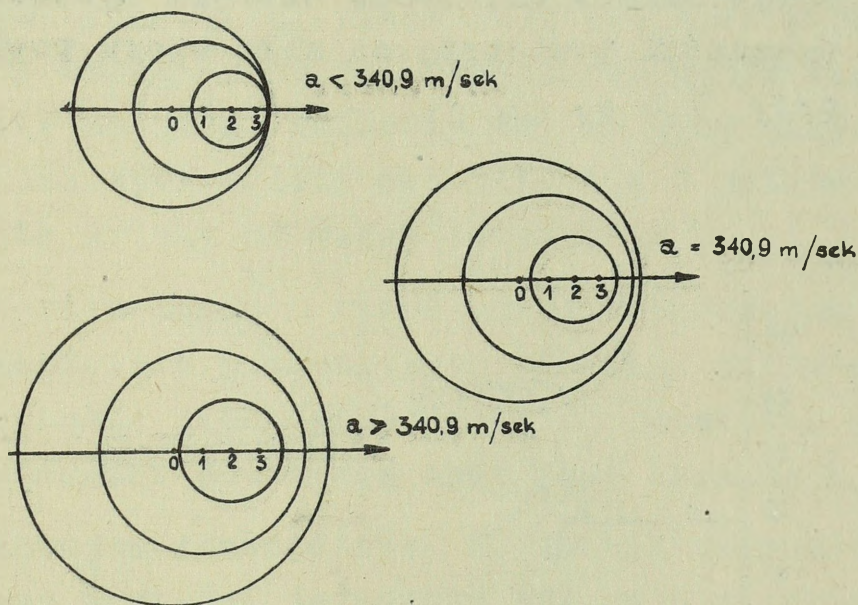
Jednym z czynników siły oporu powietrza jest opór falowy, który zależy od stosunku $\frac{V}{a}$. Charakter tej zależności wyraża wykres funkcji C_x /patrz rys. 55 i 56/. Wykres ten sporządzono na podstawie zmiennej wartości prędkości pocisku i stałej prędkości rozchodzenia się fal dźwiękowych w powietrzu $a = 340,9$ m/sek.

Jak wiadomo z fizyki, prędkość rozchodzenia się fal dźwiękowych jest wielkością zmienną, bezpośrednio zależną od prężności powietrza; im większa prężność, tym prędzej rozchodzą się fale dźwiękowe i odwrotnie. Prężność powietrza z kolei zależy od jego temperatury; przy zwiększeniu temperatury powietrza prężność wzrasta, przy zmniejszeniu - maleje. W artylerii przeważnie wykorzystuje się bezpośrednią zależność "a", od temperatury powietrza, przyjmując że zmiana temperatury powietrza o $\pm 1^\circ\text{C}$ powoduje zmianę prędkości rozchodzenia się fal dźwiękowych o $\pm 0,61$ m/sek, co stanowi około 0,18% tabelarnej jej wartości.

Rozpatrzmy charakter zależności oporu falowego od zmiany prężności powietrza.

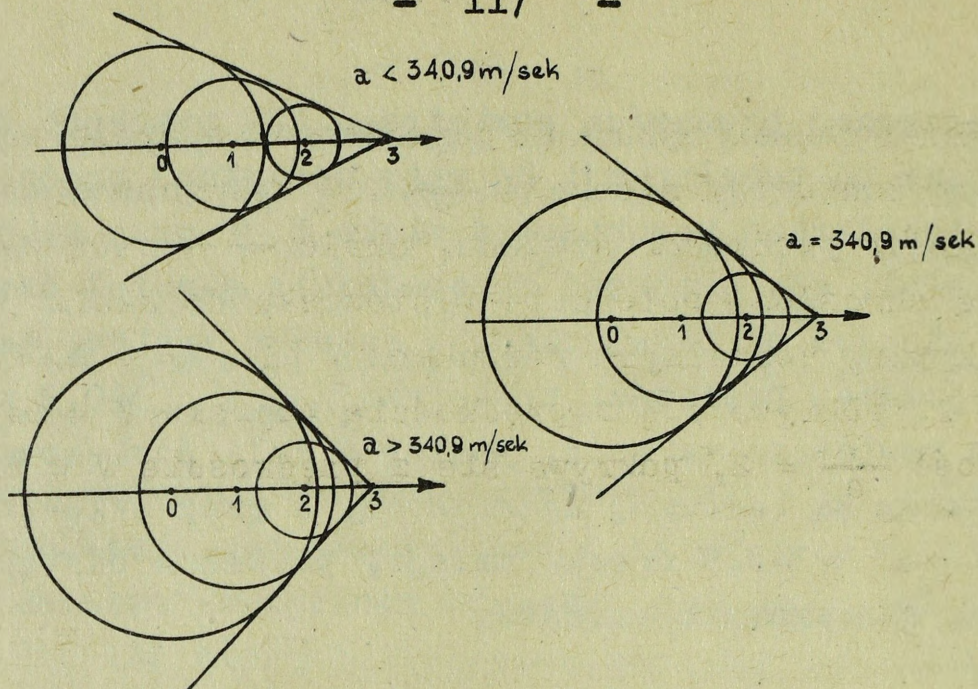
Na rysunku 62 pokazane jest wzajemne położenie pocisku i tworzonych przez niego fal dźwiękowych: 1/przy

zmniejszonej prędkości powietrza, gdy prędkość dźwięku jest mniejsza od tabelarnej: 2/ przy normalnej prędkości, tj. przy tabelarnej prędkości dźwięku i 3/ przy zwiększonej prędkości, gdy prędkość rozchodzenia się fal dźwiękowych jest większa od tabelarnej. Z rysunku wynika, że przy zmniejszonej prędkości powietrza $a < 340,9$ m/sek/ siła oporu powietrza wzrasta, ponieważ fale dźwiękowe przed pociskiem są bardziej zgęszczone, a przy zwiększeniu prędkości $a > 340,9$ m/sek/ maleje, ponieważ odstęp między falami dźwiękowymi wzrasta.

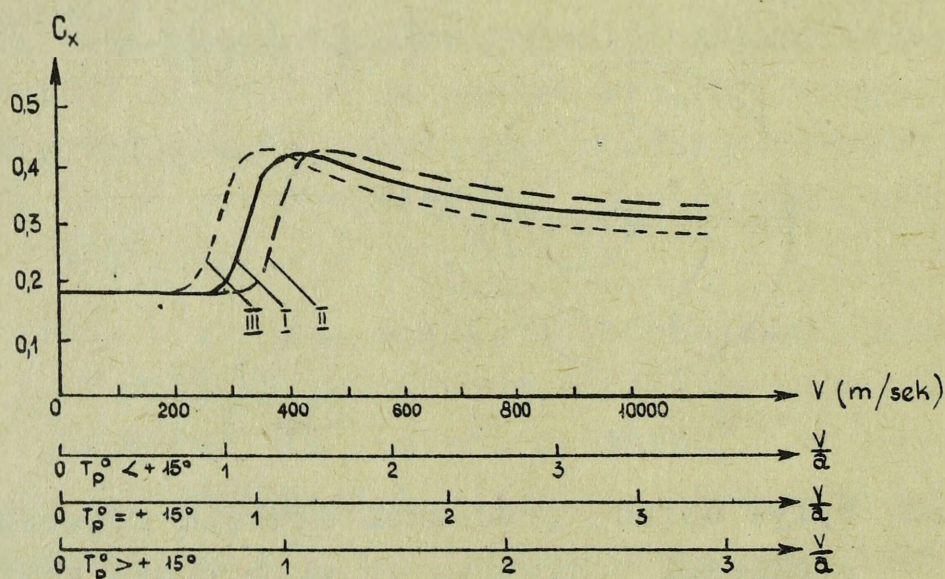


Rys. 62. Wpływ zmiany prędkości dźwięku spowodowany zmianą prędkości powietrza na siłę oporu powietrza przy $V > a$

Rysunek 63 przedstawia powyżej opisane przypadki dla prędkości pocisku większej od prędkości dźwięku. Jak wynika z rysunku, przy spadku prędkości powietrza $a < 340,9$ m/sek/ zachodzi bardziej intensywne wydłużanie się strefy zgęszczenia powietrza /fali balistycznej/, w wyniku czego gęstość fali balistycznej, a tym samym i opór powietrza zmniejsza się; przy zwiększeniu prędkości powietrza $a > 340,9$ m/sek/ zachodzi zjawisko odwrotne.



Rys. 63. Wpływ zmiany prędkości dźwięku spowodowanej zmianą prędkości powietrza na siłę oporu powietrza przy $V > a$.



Rys. 64. Wykresy funkcji C_x przy różnych temperaturach powietrza.

Rysunek 64 przedstawia wyżej wspomnianą zależność w postaci trzech wykresów funkcji C_x . Pierwszy wykres /linia ciągła/ sporządzony jest dla żąbelarnych warunków strzelania / $T_p^\circ = +15^\circ\text{C}$, $a = 340,9 \text{ m/sek.}$./, drugi /linia przerywana/ - dla zwiększonej prędkości / $T_p^\circ > +15^\circ\text{C}$ i $a > 340,9 \text{ m/sek.}$./, a trzeci wykres /linia kropkowana/ - dla zmniejszonej prędkości / $T_p^\circ < +15^\circ\text{C}$ i $a \leq 340,9 \text{ m/sek.}$

W dolnej części rysunku sporządzone są skale zasadniczego argumentu tj. stosunku $\frac{V}{a}$. W zależności od przyjętej wielkości prędkości dźwięku, skale $\frac{V}{a}$ będą zajmowały pewne określone położenie w stosunku do skali prędkości V . I tak przy normalnych warunkach $/ T_p^{\circ} = + 15^{\circ}C /$ wartość $\frac{V}{a} = 1$, pokrywa się z prędkością pocisku $V = 340,9$ m/sek., wartość $\frac{V}{a} = 2$, pokrywa się z prędkością $V = 681,8$ m/sek. itd. Przy zmniejszonej prężności $/ T_p^{\circ} < + 15^{\circ}C /$, podziałki skali zmniejszają się i przesuwają w lewo, a przy zwiększonej prężności $/ T_p^{\circ} > + 15^{\circ}C /$ obserwujemy zjawisko odwrotne, skala przesuwa się w prawo.

Krzywe funkcji C_x przesuwają się wraz z podziałkami $\frac{V}{a}$. Zwróćmy uwagę na to, że początkowo wszystkie krzywe pokrywają się ze sobą, świadczy to, że przy małych prędkościach pocisku opór falowy nie istnieje i całkowity opór powietrza nie zależy od wahań temperatury.

Przy strzelaniu z armat przeciwlotniczych /tj. przy dużych prędkościach początkowych pocisku/ średnie prędkości pocisku są zawsze większe od prędkości dźwięku, a więc ze wzrostem prężności powietrza opór jego wzrasta i odwrotnie.

Reasumując stwierdzamy, że zmiana prężności powietrza i zmiana jego gęstości jednakowo wpływają na zmianę siły oporu powietrza i lot pocisku. Uchylenie rozprysku, spowodowane odchyłką prężności powietrza będzie takie same, jak przy zmianie gęstości powietrza, czyli tor będzie przechodził niżej lub wyżej od toru tabelarnego i rozpryski odchyla się praktycznie wzdłuż linii równoległej do linii rzutu. Możemy więc zmianę prężności powietrza uwzględniać łącznie ze zmianą jego gęstości.

22. Wpływ odchyłki ciężaru pocisku na jego lot i położenie rozprysku

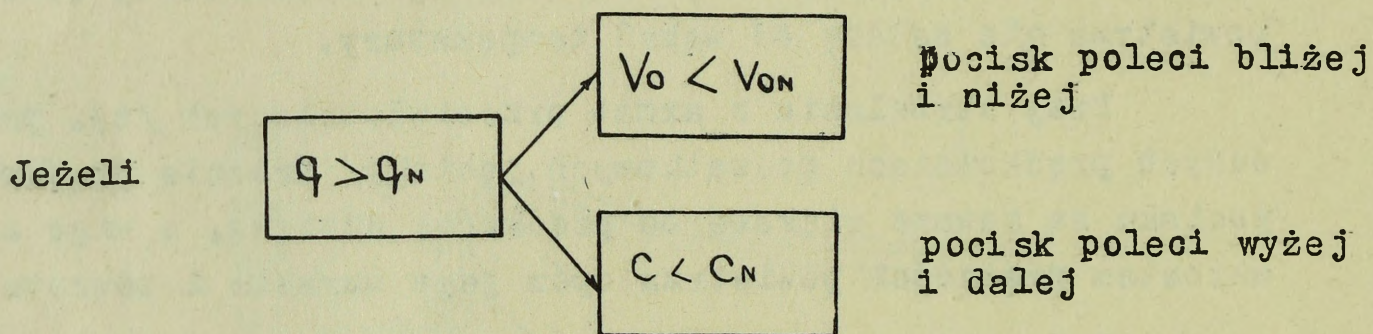
W czasie produkcji pocisków trudno osiągnąć, aby wszystkie pociski danego kalibru i wzoru posiadały dokładnie ten sam ciężar. Pewna niedokładność powstaje przy wykonywaniu korpusów pocisków, a dalsza przy napełnianiu ich materiałem wybuchowym.

Dla współczesnych pocisków tolerancja ta nie może przekraczać $\pm 3\%$ wartości ciężaru pocisku wzorcowego.

Pociski, po napełnieniu ich materiałem wybuchowym, są ważne, a odchyłki od ustalonego ciężaru zaznacza się na korpusie pocisku znakami wagowymi.

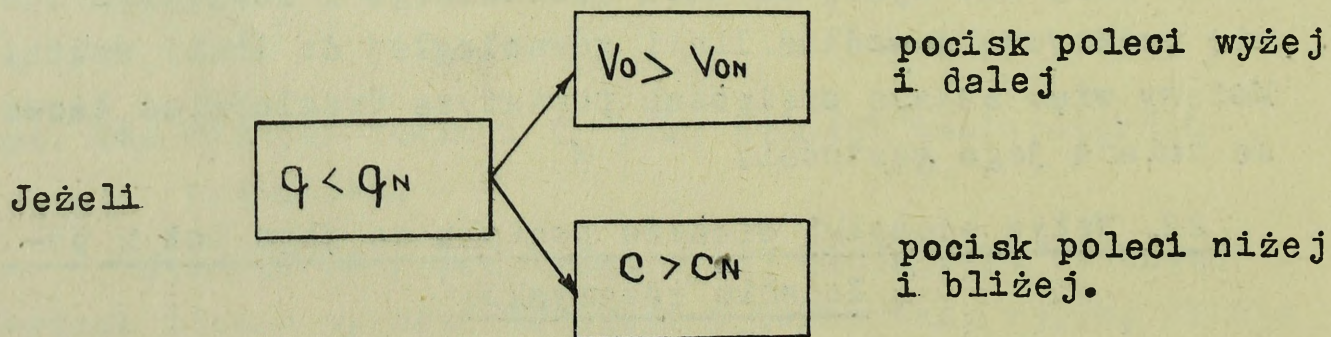
Znak N wskazuje, że pocisk posiada normalny ciężar i odchyłka nie przekracza $\pm \frac{1}{3}\%$ ustalonego ciężaru pocisku. Znaki plus lub minus wskazują, że ciężar pocisku jest większy lub mniejszy od normalnego. Każdy znak odpowiada odchyłce ciężaru od normalnego o $\frac{2}{3}\%$. Tak więc, znaków plus lub minus nie może być więcej niż cztery.

Odchyłka ciężaru pocisku wpływa na lot pocisku poprzez zmianę prędkości początkowej i poprzez zmianę współczynnika balistycznego ΔCq .



$$C = \frac{hd^2}{q} \cdot 10^3$$

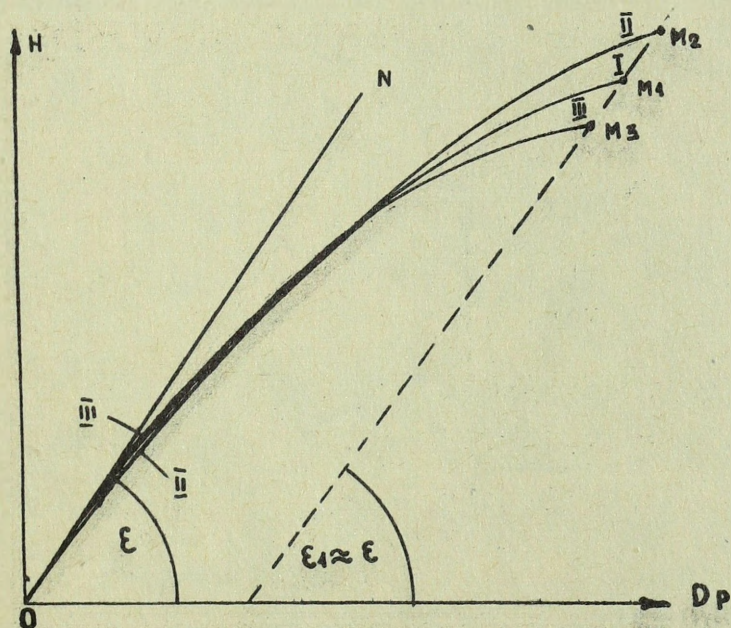
$$J = C \cdot H/y/ \cdot F/V/ \text{ m/sek}^2$$



Te dwa czynniki w obu wypadkach działają jednocześnie w kierunkach przeciwnych.

Na podstawie doświadczeń stwierdzono, że na dłuższym odcinku wznoszącej się części toru wpływ prędkości początkowej jest dominującym czynnikiem, a na pozostałej części większy wpływ ma zmiana współczynnika balistycznego.

Wpływ odchyłki ciężaru pocisku na jego lot i położenie rozprysku przedstawia rysunek 65, gdzie: I - tabelarny tor pocisku, II - tor pocisku cięższego, III - tor lżejszego pocisku. Na odcinku początkowym tor pocisku ciężkiego przechodzi niżej niż tabelarny tor, a następnie przecina go. Rozprysk cięższego pocisku nastąpi w punkcie M_2 leżącym dalej i wyżej od tabelarnego punktu M_1 . Tor pocisku lekkiego przechodzi wyżej od toru tabelarnego, przecina go i rozprysk następuje przed punktem M_1 i niżej tj. w punkcie M_3 . Odchylenie rozprysków następuje wzdłuż linii równoległej do linii rzutu.



Rys. 65. Wpływ odchyłki ciężaru na lot pocisku i położenie rozprysku.

Przy strzelaniu do celów powietrznych na małych wysokościach wpływ uwidacznia się w zmianie odległości punktu rozprysku.

23. Wpływ wiatru na lot pocisku i położenie rozprysku

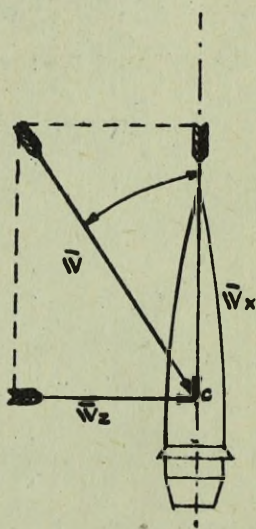
Wiatrem nazywamy ruch masy powietrza, przy czym do tego pojęcia włączamy tylko poziomy ruch powietrza - równoległy do powierzchni ziemi.

Wiatr charakteryzują - prędkość i kierunek.

Wpływ wiatru na lot pocisku zależy od szeregu czynników, między innymi od kierunku wiatru, prędkości wiatru i od czasu, w przeciągu którego działał on na lecący pocisk.

Wiatr na różnych wysokościach posiada różne prędkości i kierunki. Uwzględnianie poprawek na wiatr ziemny przy strzelaniu w warunkach bojowych jest praktycznie niemożliwe. Dlatego przy obliczaniu poprawek, zamiast wiatru rzeczywistego uwzględnia się tak zwany wiatr balistyczny. Wiatr balistyczny jest obliczany przez artyleryjskie stacje meteorologiczne i podawany jest w komunikatach meteorologicznych.

Wiatr balistyczny może posiadać różne kierunki względem płaszczyzny strzelania. Rozłożmy wektor wiatru na dwie składowe - jedną, zgodną z kierunkiem strzelania i drugą, prostopadłą do kierunku strzelania. Pierwszą będziemy nazywali wiatrem wzdłużnym i oznaczali W_x , drugą - wiatrem bocznym i oznaczali W_z /rys. 66/. Wiatr wzdłużny przeciwny do niego /wiatr czołowy/ w pierwszym wypadku może być zgodny z kierunkiem strzelania lub też przyjmuje się W_x jako dodatni, w drugim wypadku - jako ujemny.

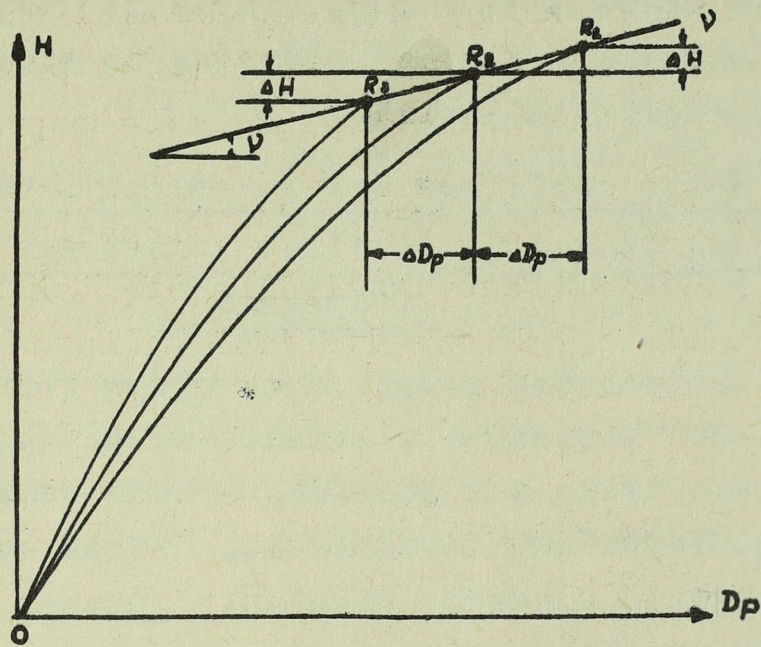


Rys. 66. Rozłożenie prędkości wiatru na składowe.

Wiatr boczny może oddziaływać z prawej lub z lewej strony. Wiatr boczny uchyla rozprysk od płaszczyzny strzelania w kierunku swego ruchu i nie wpływa na odległość poziomą i wysokość rozprysku. Wielkości uchyleń kierunków wywołane przez wiatr, podane są w tabelach lub wykresach poprawek.

Wiatr wzdłużny zmienia głównie odległość poziomą rozprysku i minimalnie wpływa na jego wysokość.

Ogólny charakter wpływu wiatru wzdłużnego przedstawia rys. 67.



Rys. 67. Wpływ wiatru wzdłużnego na położenie rozprysku.

W normalnych, bezwietrznych warunkach otrzymamy tor I. Jeżeli kierunek wiatru jest zgodny z kierunkiem strzelania, $/W_x > 0/$ pocisk zakreśli tor II. Z rysunku widać, że wiatr wpływa na krzywiznę toru /tor II różni się od toru I/ oraz mając kierunek zgodny z kierunkiem strzelania będzie zwiększał prędkość pocisku /pocisk wolniej będzie tracił swą prędkość niż na torze I/, wskutek czego pocisk poleci dalej. Dlatego też tor II przetnie tor I. Podobnie przy wietrze obojętnym $/W_x < 0/$ otrzymamy tor III, który początkowo przechodzi wyżej od toru I, ale skutek tego, że pocisk napotykając na wiatr prędzej będzie tracił swą prędkość, tor III przecina tor I i pocisk posiada mniejszą donośność.

Jeżeli w warunkach bezwietrznych otrzymamy rozprysk w punkcie R_1 , to przy tym samym czasie lotu i przy wietrze wzdłużnym zgodnym z kierunkiem strzelania, rozprysk nastąpi w punkcie R_2 , położonym dalej i trochę wyżej od punktu R_1 , a przy wietrze obojętnym rozprysk nastąpi w punkcie R_3 , leżącym bliżej i trochę niżej od punktu R_1 . Jeżeli przez punkty R_1 , R_2 i R_3 przeprowadzimy linię prostą MN, będzie ona prawie pozioma, kąt nachylenia tej prostej względem poziomego wylotu wynosi $7 + 9^\circ$. Wynika z tego, że wpływ wiatru na położenie rozprysku jest

inny, niż wpływ ΔV_0 i ΔG ; uchylenie rozprysku następuje w innym kierunku. Dlatego poprawkę na wiatr uwzględnia się przy strzelaniu oddzielnie.

24. Wpływ czynników balistycznych i meteorologicznych na czas działania zapalnika czasowego i na położenie rozprysku

Dotychczas rozpatrując wpływ poszczególnych czynników na lot pocisku i położenie rozprysku zakładaliśmy, że zmienia się tylko tor pocisku, a czas działania zapalnika czasowego odpowiada tabelarnemu. Jednak jak wykazują doświadczenia, ulegając działaniu różnych przyczyn, czas działania zapalnika nie będzie odpowiadał wartości tabelarnej, co spowoduje odchylenie się rozprysku od punktu tabelarnego.

W artylerii przeciwlotniczej są stosowane zapalniki czasowe mechaniczne i prochowe. Zapalniki te w znacznym stopniu różnią się między sobą, zarówno ze względu na zasady działania, jak budowy i czułości na bodźce zewnętrzne. Z tych też względów rozpatrzymy je oddzielnie.

Działanie prochowego zapalnika oparte jest na paleniu się ścieżki prochowej, wprasowanej w pieśńoienie zapalnika. Czas działania zapalnika /od momentu wystrzału do momentu rozprysku/ zależy od ustawionej długości ścieżki prochowej i od prędkości jej palenia się. Długość ścieżki prochowej ustawia się w zależności od współrzędnych punktu rozprysku. Prędkość palenia się ścieżki zależy od ciśnienia wewnątrz zapalnika /im większe ciśnienie, tym prędzej pali się ścieżka prochowa/ i od temperatury zapalnika /im wyższa temperatura, tym prędsze ^spalanie/.

Ciśnienie wewnątrz zapalnika i temperatura ścieżki prochowej z kolei zależą od budowy zapalnika, ciśnienia ~~temperatury~~ atmosferycznego, temperatury powietrza, prędkości lotu pocisku i prędkości katowej jego ruchu wirowego. Wszystkie te czynniki są wielkościami zmiennymi i mogą zmieniać się w znacznym stopniu.

Tak na przykład prędkość 85 mm pocisku, do wysokości 9000 m może zmieniać się w granicach od 800 do 100 m/sek,

w wyniku czego ciśnienie pod kapturkiem balistycznym zapalnika T-5 zmienia się od 6,25 do 0,06 atmosfer. Uwzględnienie dużej ilości zmiennych czynników stwarza poważne trudności i niejednokrotnie nie daje pożądaných wyników, a to z tych względów, że większość warunków przy strzelaniu artylerii przeciwlotniczej zmienia się dość prędko, co stwarza konieczność uwzględniania średniej ich wartości. Z tych też względów przy strzelaniu z zapalnikami prochowymi uwzględnia się tylko najbardziej ważne czynniki, do których zaliczamy: naziemne ciśnienie powietrza, temperaturę zapalnika przyjmowaną jako równą temperaturze powietrza i prędkość początkową pocisku.

Wśród mechanicznych zapalników najszersze zastosowanie mają zapalniki z mechanizmem zegarowym, działające na zasadzie zwykłego budzika. Te zapalniki cechuje duża dokładność pomiaru czasu i stosunkowo mała czułość na wpływ zmian warunków strzelania.

Odchyłka czasu działania mechanicznego zapalnika od wartości tabelarnej zależy od wielkości i charakteru zmiany tych sił inercji, które powstają przy wystrzale i które działają na części mechanizmu zegarowego w czasie lotu pocisku od wielkości siły sprężyny poruszającej mechanizm zegarowy i od właściwości pracy regulatora.

Wielkość i charakter zmian sił inercji uzależniony jest od liniowej i kątowej prędkości pocisku, jak również od wahań osi pocisku w czasie jego lotu. Te czynniki z kolei uzależnione są od prędkości początkowej pocisku, stopnia zużycia części gwintowanej lufy, kąta podniesienia i zmiany gęstości powietrza ze zmianą wysokości, która szczególnie wpływa przy strzelaniu pod dużymi kątami podniesienia.

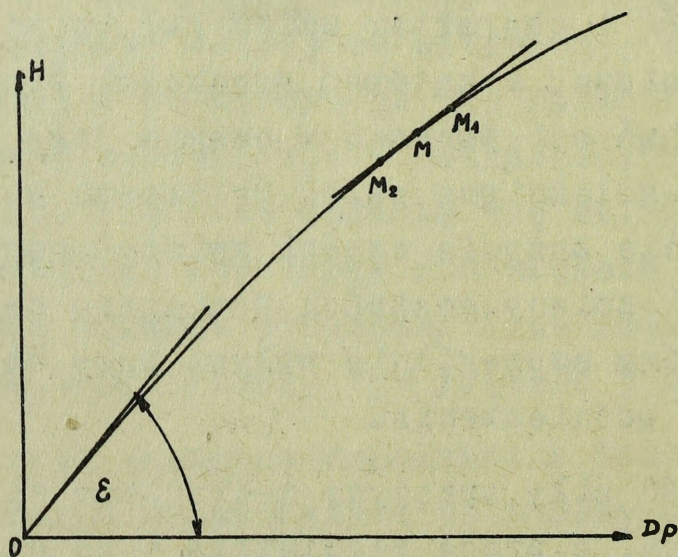
Wielkość siły sprężyny mechanizmu zegarowego zależy od jej długości, a praca regulatora - od długości włosa. Długość sprężyny i włosa zależy z kolei od temperatury zapalnika; im niższa temperatura, tym krótsza sprężyna i włos, tym prędzej pracuje mechanizm zegarowy i odwrotnie.

Do czynników wywołujących odchyłkę czasu działania zapalnika mechanicznego od tabelarnego zaliczamy:

- odchyłkę prędkości początkowej pocisku od tabelarnej / Δv_0 /,
- odchyłkę temperatury zapalnika od tabelarnej / Δt_z /;
- odchyłkę gęstości powietrza od tabelarnej / ΔG /,
- zużycie części gwintowanej przewodu lufy,
- kąt podniesienia / Ψ /.

Praktycznie, ze wszystkich czynników, największy wpływ ma odchyłka temperatury zapalnika od tabelarnej. Przy odchyłce temperatury zapalnika o 25°C czas działania zapalnika zmienia się średnio o 0,06 sek. Jest to wartość mała i nie uwzględnia się jej. Kąt podniesienia uwzględnia się przy zestawianiu tabel strzelniczych. Pozostałych czynników, jeszcze mniej istotnych niż temperatura, również nie uwzględnia się.

Najbardziej decydujący wpływ na położenie rozprysku mają te systematyczne odchyłki czasu działania zapalnika, które są właściwe dla danej partii zapalników i wynikają z procesu technologicznego fabrycznej produkcji zapalników. Tę odchyłkę określa się przez praktyczne strzelania na specjalnych poligonach i wielkość jej zamieszcza się w metryce danej partii zapalników.



Rys. 68. Wpływ odchyłki czasu działania zapalnika na położenie rozprysku.

Rozpatrzyliśmy główne przyczyny wywołujące odchyłkę czasu działania zapalnika od wartości tabelarnej / Δt /
Rozpatrzmy z kolei, jak wpływa ta odchyłka na położenie rozprysku.

Założmy, że strzelamy z działa przy określonych nastawach kąta podniesienia i zapalnika. W punkcie M powinien nastąpić rozprysk przy tabelarnym czasie lotu pocisku t /rys. 68/.

Jeżeli czas działania zapalnika okaże się większy od tabelarnego, to rozprysk nastąpi w punkcie M_1 , położonym dalej od punktu tabelarnego, a gdy czas działania zapalnika okaże się mniejszy od tabelarnego, to pocisk rozzerwie się w punkcie M_2 , nie dolatując do punktu tabelarnego. Wielkość odchylenia rozprysku od tabelarnego punktu zależy od prędkości pocisku V i od odchyłki czasu działania zapalnika Δt .

Na przykład, jeżeli prędkość pocisku w punkcie tabelarnym $V = 420$ m/sek., a odchyłka czasu $\Delta t = -0,2$ sek. to zakładając, że prędkość pocisku na małym odcinku nie zmieni się przyjmujemy, że pocisk odchylił się o wartość $420 \cdot (-0,2) = -84$ m.

Ze względu na to, że na niewielkim odcinku tor możemy przyjąć za linię prostą, uważamy, że odchylenie się rozprysku spowodowane odchyłką czasu działania zapalnika od jego wartości tabelarnej następuje wzdłuż stycznej do toru w punkcie tabelarnym.

Mówiąc o tabelarnym czasie działania zapalnika, nie należy zapominać o tabelarnym czasie lotu pocisku. Jako mechanizm, zapalnik może działać prawidłowo i czas jego działania będzie zgodny z tabelarnym. Jednak rozprysk wskutek błędu czasu lotu pocisku, spowodowanego nieuwzględnieniem warunków strzelania, nie nastąpi w punkcie tabelarnym.

Dla mechanicznych i prochowych zapalników odchyłka czasu lotu spowoduje przesunięcia się rozprysku wzdłuż toru.

Ogólnie rzecz biorąc, należy mieć na uwadze, że przy dużych prędkościach pocisków błędy w czasie lotu pocisku lub w czasie działania zapalnika powodują poważne odchylenia rozprysków w odległości.

Wykonano w 60 egz.

Druk GB dn. 9.1.61r.

