

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Унутрашње балистичко пројектовање

Број индекса: 361/2014

Стефан Д. Јовановић

**Оптимизација унутрашње балистичких параметара
у фази пројектовања противавионског наоружања
мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. проф. др Богдан Недић – председник комисије**
- 2. доц. др Александар Кари – члан**
- 3. проф. др Љубиша Танчић – ментор**

**Датум
одбране: _____**

Оцена: _____

Крагујевац, јул, 2016.

На основу компаративне анализе постојећих противавионских система оптимизовати унутрашње балистичке параметре у фази пројектовања противавионског наоружања. Критеријум оптимизације је што већа почетна брзина пројектила а што нижи максимални притисак барутних гасова у цеви. Оптимизацију извршити на основу следећих теза:

1. Уводно разматрање проблема;
2. Дефинисање математичког модела;
3. Програмско решење модела;
4. Компаративна анализа резултата прорачуна;
5. Закључак са смерницама за будући рад на проблему.

Препоручена литература:

- [1] М. Цветковић: Унутрашња балистика, Сектор за ШОНИД, ВТА ВЈ, Београд, 1999.
- [2] Љ. Танчић: Унутрашње балистичко пројектовање, Министарство одбране, Универзитет одбране, Војна академија, Београд, 2014.
- [3] М. В. Калезић: Пројектовање артиљеријских система, Ваљево Принт, Београд, 2010.
- [4] З. Ристић: Механика наоружања - артиљеријска оруђа, Министарство одбране, Универзитет одбране, Војна академија, Београд, 2014.
- [5] М. Угричић: Конструкција пројектила и упаљача, Министарство одбране, Универзитет одбране, Војна академија, Београд, 2014.
- [6] Д. Регодић: Збирка задатака из спољне балистике, Војна академија, Београд, 2003.
- [7] Д. Регодић: Спољна балистика, Војна академија, Београд, 2006.

У Крагујевцу,

15.09.2015.

Предметни наставник

Проф. др Љубиша Танчић

РЕЗИМЕ РАДА

Овај рад се бави конструисањем цеви калибра 30 mm на основу постојећег решења цеви противавионског топа М86. Оптимално решење се огледа у избору најпогоднијег модела и типа барута, запремине лежишта метка и других параметара са којима се изводи унутрашње балистички прорачун. Резултати унутрашње балистичког прорачуна користе се као улазне величине при пројектовању унутрашње и спољашње трасе цеви, на основу неке од метода отпорности цеви. За конструсану цев се даје идејно решење метка и спољно балистички прорачун за одређивање максималног домета пројектила.

Кључне речи: **топ, максимални притисак, почетна брзина, цев, пројектил**

ABSTRACT

Construction of barrel 30 mm for anti-aircraft defence. The goal is to get a best tipe of powder, volume of deposits bullet, and other parameters that are used for ballistic. Results of inside ballistic are used for input values in method resistance of barrel, when is coming for projecting of inside and outside of barrel. For constructed burrel is given a idea of how will look projectile, and based on that it is calculated external ballistics calculation for new barrel and new projectile.

Key words: **cannon, maximum pressure, initial speed, barrel, projectile**

САДРЖАЈ

1. УВОД.....	6
1.1. Развој наоружања кроз историју.....	6
1.2. Развој противавионских топова у свету	7
1.3. Циљ мастер рада	12
1.4. Унутрашње балистички параметри	12
1.5. Ограничења при балистичком пројектовању	14
2. МЕТОДА ДРОЗДОВА	16
2.1. Претходни период	16
2.2. Први период.....	17
2.3. Други период.....	19
2.4. Прорачун времена.....	20
2.5. Одређивање параметара новог средства.....	21
3. КОНСТРУИСАЊЕ ЦЕВИ	32
3.1. Спољна траса цеви	32
3.2. Еластична отпорност моноблок цеви	33
3.3. Унутрашња траса цеви.....	35
4. КОНСТРУИСАЊЕ МЕТКА	40
4.1. Развој новог пројектила	41
4.1.1. Конструисање водећег прстена	41
4.1.2. Димензионисање гнезда водећег прстена	43
4.1.3. Одређивање спољне трасе кошуљице	43
4.1.4. Трасирање задњег дела пројектила	44
4.1.5. Трасирање предњег дела пројектила.....	44
4.1.6. Одређивање унутрашње стране кошуљице пројектила.....	46
4.2. Одређивање масе пројектила.....	47
4.3. Конструисање чауре.....	48
5. СПОЉНО БАЛИСТИЧКИ ПРОРАЧУН	51
6. ЗАКЉУЧАК	55
7. ЛИТЕРАТУРА.....	56

ПРИЛОГ 1: УБ ПРОРАЧУН ПО МЕТОДИ РУНГЕ-КУТА	58
1.1. Улазна датотека „UJK30.DAT“	58
1.2. Излазна датотека „IJK30.DAT“	58
ПРИЛОГ 2: ДИМЕНЗИНОИСАЊЕ ЦЕВИ	61
2.1. Улазна датотека „UBPX30.DAT“	61
2.2. Улазна датотека „ULUB30.DAT“	62
2.3. Излазна датотека „IDACE.DAT“	62
ПРИЛОГ 3: ОДРЕЂИВАЊЕ МАСЕ ПРОЈЕКТИЛА.....	65
3.1. Улазна датотека „UMASA.DAT“	65
3.2. Излазна датотека „IMASA.DAT“	66
ПРИЛОГ 4: СПОЉНО БАЛИСТИЧКИ ПРОРАЧУН.....	67
4.1. Улазна датотека „SB2U.DAT“	67
4.2. Улазна датотека „SB2K.DAT“	67
4.3. Излазна датотека „SB2I.DAT“	68
4.4. Улазна датотека ADK0U.DAT	74
4.5. Излазна датотека ADK0I.DAT	74

1. УВОД

Конструисање новог оружја/оруђа је комплексан задатак, за које је потребно познавање неколико научно-истраживачких дисциплина као што су унутрашња балистика, спољна балистика, балистика на мети, конструкција оружја/оруђа, конструкција пројектила и упаљача и др. *Унутрашња балистика* је научна дисциплина која изучава све процесе који се дешавају у унутрашњости цеви оружја/оруђа након удара ударне игле у иницијалну капислу, па све док дно пројектила не напусти уста цеви. Унутрашња балистика има два задатка[1] :

- Први задатак је одређивање законитости кретања пројектила и развоја гасодинамичких карактеристика за познато оруђе/оружје. Под тим појмом се подразумевају сва оруђа/оружја која су произведена и чији су познати конструктивни подаци.
- Други задатак је унутрашње балистичко пројектовање новог оруђа/оружја. Он обухвата дефинисање барута који ће се користити и одређује конструктивне карактеристике цеви. Овај задатак се своди на проблем оптимизације зато што постоји много више непознатих него што је једначина.

Из домена балистичког пројектовања следе три задатка[2]:

- Класичан задатак захтева калибар цеви, масу и почетну брзину пројектила, а одређује карактеристике канала цеви, тип барута, основне карактеристике пуњења и све податке који су потребни за прорачун цеви, пројектила и лафета.
- Уопштени задатак задаје максимални домет оруђа земаљске артиљерије, пробојност на задатој даљини циља за противоклопна оруђа или хоризонталну даљину и висину циља за противавионска оруђа. Овај задатак се састоји из избора оптималног оруђа и класичног задатка балистичког пројектовања.
- Упрошћен задатак даје додатна ограничења, као што су коришћење већ постојеће муниције, или исту цев, лафет или неки други склоп. Решавање овог задатка се врши исто као и класични с тим што су неки подаци унапред познати, па се не морају накнадно решавати.

Класични задатак се решава на два начина:

- табичним и
- аналитичким методама [1].

Више се примењују аналитичке методе, као што су методе Слухоцког, Серебрјакова и Чујева, док је таблична метода, метода ГАУ. Табличне методе се данас користе на полигонима током експериментисања.

1.1. Развој наоружања кроз историју

Откриће барута и његова примена као погонско средство представља нову еру у развоју наоружања, где се развојем науке дошло до стварања великог броја барута, енергетских материја, као и оружја и оруђа, па чак и до средстава која се могу користити за масовна уништења као што су нуклеарне бомбе, биолошке и хемијске ракете и др. Почетком Хладног рата је дошло до поделе света на две интересне сфере. Једна је обухватала земље Варшавског пакта, а другу су чиниле

државе које су биле чланице НАТО пакта. Због те поделе је дошло до озбиљног наоружавања војски и чланица тих савеза. Можда ни један рат није довео до таквог развоја наоружања као Хладни, јер се за то време развијало и нуклеарно оружје, а по броју нуклеарних бомби је СССР држао примат са највише бојевих глава. Поред СССР-а (данашња Федерација Русија) нуклеарне бомбе поседују и САД, ВБ, Француска, Кина, Индија, Пакистан и наводно Северна Кореја.

Открићем авиона и његовим развијањем је почело и његово коришћење у војне сврхе, где су се у почетку користили као извиђачи, а затим и за средства којим се може напасти непријатељ. Због тога су војске почеле да развијају противавионске системе, развијајући тиме своју противваздушну одбрану. Развој ПВО је ишао у два смера. Први је био развој противавионских топова који су се масовно користили за време Другог светског рата, а који се и данас развија и развој ракета, односно ракетне технике чији се развој убрзано вршио након Другог светског рата.

Аутоматски топови који се користе у ПВО су калибра од 20mm до 57mm. Најважнија ствар код аутоматских топова јесте обезбеђивање довољне удаљености до које ће стићи пројектил као и почетна брзина која настаје као последица дејства барутних гасова.

1.2. Развој противавионских топова у свету

Противавионски топови су аутоматски топови који могу бити калибра од 20 до 57 mm и налазе се у наоружању многих војски. Уграђују се на борбене станице са којих могу дејствовати на циљ. При њиховом развоју се ишло ка испуњавању следећих захтева [6]:

- повећање домета;
- оперативност борбене употребе;
- ефикасност муниције на циљу;
- повећање брзине гађања;
- подизање нивоа заштите послуге и оруђа;
- маневарска својства и поузданост оруђа у целини;
- употреба нове муниције;
- интеграција система за управљање ватром у командно-информационе системе вишег нивоа.

За време 2. светског рата су се као противавионска средства користили аутоматски топови. Оруђа су се уграђивала на постоља или на платформе чинећи тако самоходна оруђа. Примери противавионских топова су руски противавионски топ ЗСУ-57-2 који користи два топа калибра 57mm. У СССР-у су развили самоходно противавионско оруђе ЗСУ-23-4, које користи 4 топа, калибра 23mm, а конструисано је да замени противавионски топ ЗСУ-57-2. Поред ова два противавионска топа, развијен је противавионски топ С-60, који је користио муницију калибра 57mm. У Чехословачкој је развијен противавионски топ Прага који користи два топа калибра 30mm, а на основу чије лиценце је развијен противавионски топ Видра у крагујевачкој фабрици „Застава“. Противавионски топови Бофорс модел L60 и L70 калибра 40mm се и дан данас налазе у великом броју армија. У Швајцарској је развијен двоцевни противавионски топ 35mm под називом Oerlikon. У Немачкој је конструисан противавионски топ МК 20 Rh202, калибра 20mm које је у оперативној употреби немачке војске.

GAU-8 Avenger је топ америчке производње и користи пројектил калибра 30x173 mm. У оперативној употреби војске САД-а налази се још од 1977. године. Карактерише га висока прецизност, па при гађању циљева са удаљености од 1200 метара 80% пројектила заврши у кругу од 6 метара [7]. ГШ-30-1 је топ руске производње, налази се у оперативној употреби од 1980. године. ГШ-30-2 је аутоматски топ који је модификован и у односу на ГШ-30-1 има дужу цев, па му је самим тим повећана почетна брзина. ГШ-6-30 је још један топ руске производње. Налази се у оперативној употреби од 1975. године, а користи калибар 30x165 mm. Противавионски топ 30/2 mm М53/59 Прага је произведена у Чешкој. Развијен је као алтернатива руском оруђу ЗСУ-57-2. У случају потребе топ се може скинути са возила и дејствовати са земље. Ефикасан домет је 3000 метара.

Табела 1.1. Основни подаци о постојећим средствима [7,8,9,10,11,12]

Средство	Видра	Прага	ГШ-30-1	ПАТ М55	ГШ-6-30	ЗСУ -57-2
Карактеристике						
Калибар (mm)	30	30	30	20	30	57
Ефективни домет (m)	3000	3000	2500	1500	2500	4500
Маса (kg)	215	224	46	1100	149	4500
Поље дејства по висини (°)	од -5 до +85	од -10 до +85	од -5 до +85	од -5 до +83	од -5 до +85	од -5 до +85
Број цеви	1	1	1	2	6	2
Почетна брзина – пројектила (m/s)	1105	1033	860	835-850	845	1000
Брзина гађања у минути	1000	840-900	1500-1800	1950-2250	4000-6000	210-240
Максимални притисак барутних гасова (MPa)	330	385	299	310	280	310
Земља порекла	Србија	Чешка	Русија	Србија	Русија	Русија

Табела 1.2. Основни подаци о постојећим средствима [13,14,15,16,17,18]

Средство Карактеристике	GAU-8 Avenger	Bofors L- 70	MK 20 Rh202	Oerlikon GDF	ЗСУ-23-4
Калибар (mm)	30	40	20	35	23
Ефикасни домет (m)	1220	3700	1600-2500	3600	3000
Маса (kg)	281	163	75	6400	19000 (маса система)
Поље дејства по висини (°)	од -5 до +85	од -4 до +90	од -5 до +83.5	од -4 до +85	од -4 до +85
Број цеви	7	1	1	2	4
Почетна брзина пројектила (m/s)	1070	1005-1025	1100	1175	970-980
Брзина гађања у минути	4200	300	880-1030	550	850-1000
Максимални притисак барутних гасова (МПа)	315	320	305	280	295
Земља порекла	САД	Шведска	Немачка	Швајцарска	Русија

Најважније карактеристике било ког противавионског оруђа су ефикасан домет пројектила, почетна брзина пројектила, максималан притисак барутних гасова и број пројектила испаљених у минути. Иако нема највећи ефикасан домет, оруђе које има најбоље карактеристике је Oerlikon GDF, који има највећу почену брзину од 1175 m/s, најмањи максимални притисак барутних гасова од 280 МПа, а број испаљених пројектила у минути му је 550. Од понуђених оруђа највећи домет има ЗСУ-57-2 од 4500 метара. Оруђе које испали највише пројектила у минути је ГШ-6-30, а њихов број се креће од 4000 до 6000.

Следеће слике приказују постојеће аутоматске топове.



Слика 1.1. Противавионски топ 30 mm Прага M53/59 [6]



Слика 1.2. Противавионски топ 23 mm ZSU-23-4 [17]



Слика 1.3. Противавионски топ 40 mm Bofors L-70 [15]



Слика 1.4. Противавионски топ 35 mm Oerlikon [16]

1.3. Циљ мастер рада

Циљ мастер рада је да се на основу дефинисаних жељених података као што су почетна брзина, максимални притисак барутних гасова, маса пројектила и дужина водишта пројектила израчунају унутрашње балистички параметри на основу којих се може конструисати цев оруђа, пројектил за дато оруђе као и прорачун лета пројектила спољно балистичким прорачуном. Задатак је добити почетну брзину већу од 1105 m/s, а да се притом добије максимални притисак барутних гасова који неће бити много већи од максималног притиска барутних гасова у топу М86.

Реализацијом рада треба да се дефинише решење задатка унутрашње балистичког пројектовања. Оптимално решење огледаће се у избору најпогоднијих физичко-хемијских и балистичких карактеристика барута, масе барута, и других параметара са којима ће се изводити унутрашње балистички прорачуни на рачунару. Резултати унутрашње балистичког прорачуна, првенствено притисак барутних гасова у цеви, користиће се као улазна величина при конструисању цеви.

Конструисаће се цев бирањем једне од теорија чврстоће. Након конструисања цеви, пројектоваће се метак. На основу свих добијених података, извршиће се спољно балистички прорачун који служи за одређивање максималног домета пројектила.

1.4. Унутрашње балистички параметри

Унутрашње балистички параметри су они који су важни при балистичком пројектовању. То су [2]:

Запремина барутне коморе W_0 , дефинише се у релативном односу са масом пројектила. Однос запремине барутне коморе и масе пројектила W_0/m се креће у границама од 10^{-4} до $2 \cdot 10^{-3}$. Овај однос зависи од почетне брзине пројектила. Однос W_0/d^3 се креће у границама од 1,6 до 33.

Дужина цеви L_c и дужина канала цеви L_k , дефинише се у односу на калибар пројектила као L_c/d и L_k/d . На овај коефицијент велики утицај има почетна брзина. Коефицијент се креће обично испод 100, али за брзине пројектила преко 1500 m/s могу бити и преко 100.

Релативни пут пројектила λ_u , дефинише се као однос укупног пута пројектила у цеви и дужине барутне коморе.

$$\lambda_u = \frac{X_u}{X_0} \quad (1.1)$$

где су:

$$X_0 = \frac{W_0}{S} \quad (1.2)$$

X_u – укупан пут пројектила у цеви;

S – попречни пресек цеви.

$$S = n_s d^2 \quad (1.3)$$

где су:

n_s – коефицијент попречног пресека цеви и креће се у границама од 0,8 до 0,82 за артиљериска оруђа и 0,83 за стрелјачка оружја.

Релативан пут пројектила се креће у границама од 3 до 15 за артиљеријска оруђа, од 3 до 4 за оруђа великих брзина, од 8 до 10 за стрељачка оружја, од 7 до 11 за хаубице и од 5 до 6 за цев најмање масе при осталим средњим вредностима.

Коефицијент проширења барутне коморе χ , дефинише се као однос сведене дужине барутне коморе и стварне дужине барутне коморе.

$$\chi = X_0 / X_{\text{ком}} \quad (1.4)$$

где је:

$X_{\text{ком}}$ - стварна дужина барутне коморе.

Вредности коефицијента проширења барутне коморе се крећу од 1,05 до 3 за артиљеријска оруђа, а преко 4 за стрељачка оружја и противтенковска оруђа.

Густина пуњења ρ , дефинише се као однос масе барута и запремине барутне коморе.

$$\rho = \frac{m_b}{W_0} \quad (1.5)$$

где је:

m_b – маса барута

Маса барута m_b , дефинише се у релативном односу према маси пројектила m_b/m . Овај однос се креће у границама од 0,01 до 0,13 и зависи од почетне брзине пројектила.

Коефицијент масе пројектила K_m , дефинише се као однос масе пројектила и калибра на трећи.

$$K_m = m/d^3 \quad (1.6)$$

Укупни импулс притиска барутних гасова I_k , дефинише се у односу на калибар I_k/d и креће се у границама $(0,5 - 25) \cdot 10^4$ [MPas/mm]

Параметар Дроздова B спаја у једну целину три претходна параметра и дефинише се следећим изразом:

$$B = \frac{s_c^2 I_k^2}{\phi m m_b f_b} = \frac{n_s^2 \left(\frac{I_k}{d}\right)^2}{\phi \frac{m_b}{m} f_b K_m^2} \quad (1.7)$$

Параметар Дроздова служи за одређивање максималног притиска и положаја пројектила на крају сагоревања.

Релативни пут пројектила K_k , дефинише се као однос пређеног пута на крају сагоревања барута и укупног пута пројектила у цеви:

$$K_k = X_k / X_u \quad (1.8)$$

Вредност релативног пута пројектила треба бити мањи од 1. Креће се у границама од 0,5 до 0,7 за топове и од 0,2 до 0,3 за хаубице са максималним пуњењем.

Коефицијент моћи оруђа K_e , дефинише се као однос кинетичке енергије пројектила и калибра на трећи.

$$K_e = E_0 / d^3 \quad (1.9)$$

Коефицијент моћи оруђа се може приказати следећом формулом:

$$K_e = \frac{m v_0^2}{2 d^3} \quad (1.10)$$

Коефицијент моћи оруђа се креће у границама од $(1 \text{ до } 17) \cdot 10^9$ J/m³.

Коефицијент искоришћења јединице масе пуњења K_{mb} , дефинише се као однос кинетичке енергије пројектила на устима цеви и масе пуњења. Представља се следећом једначином:

$$K_{mb} = \frac{E_0}{m_b} = \frac{mv_0^2}{2m_b} = \frac{\frac{v_0^2}{2}}{\frac{m_b}{m}} \quad (1.11)$$

Коефицијент корисног дејства брутног пуњења K_0 , дефинише се као однос кинетичке енергије пројектила на устима цеви и енергије барутног пуњења.

$$K_0 = \frac{E_0}{E} \quad (1.12)$$

Коефицијент корисног дејства се креће у границама од 0,2 до 0,3.

Живот цеви N , n_{op} , подразумева број метака који се може испалити из цеви, а да цев има карактеристике максималног притиска барутних гасова и почетне брзине у дозвољеним границама.

1.5. Ограничења при балистичком пројетовању

Дужина канала цеви је функција следећих параметара:

$$L_k = f(v_0, m, p_m, m_b, \rho, \chi, p_0, f_b, \alpha, \rho_b, \theta, \kappa, n_s, d) \quad (1.13)$$

Притисак форсирања зависи од конструкције жлебова, тела пројектила и облика водећег прстена, али се узима његова средња вредност. Модел и тип барута често се бирају независно од решења задатка балистичког пројектовања, односно према неком ограничењу. Ретко се узима нови барут, тако да се карактеристике барута не варирају. Дошло се до сазнања да се не може постићи знатно повећање почетне брзине пројектила применом прогресивних барута, па се при балистичком пројектовању вредност κ не варира.

При задатим v_0, m, d и непромењивим вредностима $p_0, f_b, \alpha, \rho_b, \theta, n_s$ биће:

$$L_k = f(p_m, m_b, \rho, \chi) \quad (1.14)$$

Укупна дужина цеви је једнака збиру дужина барутне коморе, прелазног конуса, и дужини водишта пројектила, а она мора бити мања од дозвољене дужине цеви па је:

$$L_c \leq L_{cdoz} \quad (1.15)$$

Поред дозвољене дужине цеви постоји услов који карактерише масу цеви:

$$m_c \leq m_{cdoz} \quad (1.16)$$

где су:

m_c - маса цеви;

m_{cdoz} – дозвољена маса цеви.

Маса цеви зависи од њене дужине и од параметара (p_m, ρ, χ) па важи услов:

$$m_c(p_m, \rho, \chi, L_k) \leq m_{cdoz} \quad (1.17)$$

Услов за густину пуњења је:

$$\rho_{min} \leq \rho \leq \rho_{max} \quad (1.18)$$

Услов за животни век цеви је:

$$N(L_k, p_m, \rho, \chi) \geq N_{doz} \quad (1.19)$$

где је N_{doz} дозвољени живот цеви (минимални).

Услов за максимални притисак је:

$$p_m \leq p_{mdoz} \quad (1.20)$$

За запремину барутне коморе се узима услов :

$$\frac{m_b}{\rho} = W_{0doz} \quad (1.21)$$

где је p_{mdoz} максимални дозвољени притисак.

Положај краја сагоревања барута у цеви утиче на растурање почетних брзина, а оно на тачност гађања. Због тога се поставља ограничење на величину K_k и обично је услов :

$$K_k < 0,8 \quad (1.22)$$

За коефицијент проширења барутне коморе се поставља услов:

$$X_{min} \leq X \leq X_{max} \quad (1.23)$$

Ово су нека од ограничења. У пракси се могу јавити и друга ограничења.

2. МЕТОДА ДРОЗДОВА

Метода Дроздова се користи код оруђа која користе једну врсту барута, као што су стрељачка оруђа, топови и др. Решавање система једначина се врши по периодима. Изузетак је прорачун времена који се изводи јединствено за цео ток процеса опаљења.

Полазне једначине су [1]:

- Једначина биланса енергије:

$$pS_c(X_\psi + X) = f_b m_b \psi - \frac{k-1}{2} \phi m v^2 \quad (2.1)$$

- Једначина кретања пројектила:

$$\phi m \frac{dv}{dt} = pS_c \quad (2.2)$$

- Дефиниција брзине пројектила:

$$v = \frac{dx}{dt} \quad (2.3)$$

- Брзина сагоревања барута:

$$u_z = u_{z0} p \quad (2.4)$$

- Релативна сагорела маса барута:

$$\psi = \kappa y (1 + \lambda y + \mu y^2) \quad (2.5)$$

- Релативна сагоревајућа површина барутног зрна:

$$\sigma = 1 + 2\lambda y + 3\mu y \quad (2.6)$$

- Сведена дужина слободне запремине:

$$X_\psi = \frac{W_\psi}{S_c} = \frac{1}{S_c} \left[W_0 - \frac{m_b}{\rho_b} (1 - \psi) - \alpha m_b \psi \right] \quad (2.7)$$

2.1. Претходни период

Претходни период је период у коме нема кретања пројектила, већ само сагоревање барута у простору сталне запремине. Променљиве карактеристике су ψ_0 , σ_0 и y_0 , а њихове једначине су дате у наставку.

$$\psi_0 = \frac{\frac{W_0 - 1}{m_b \rho_b}}{\frac{f_b + \alpha - 1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_b}} \quad (2.8)$$

$$\sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\kappa_1} \psi_0} \quad (2.9)$$

$$y_0 = \frac{\sigma_0 - 1}{2\lambda_1} \quad (2.10)$$

Ако се жели израчунати време трајања претходног периода, онда се на основу израза за притисак у функцији времена у константној запремини добија [1]:

$$t_0 = \frac{I_k (1 - \alpha \rho)}{f_p} \ln \frac{p_0}{p_p} \quad (2.11)$$

где је:

$$I_k = \frac{r_0}{u_{z0}}$$

2.2. Први период

Почетак првог периода представља почетак кретања пројектила, а завршава се када се заврши са сагоревањем барутног пуњења. Почетни подаци су: $t = v = X = 0$ и $y_0, p_0, \psi_0, \sigma_0$. Крајњи подаци су: t_k, v_k, X_k, p_k и $y_k = \psi_k = 1$.

За независну променљиву, помоћу које се изражавају све остале променљиве, аутор методе усваја релативну сагорелу дебљину барута од почетка првог периода:

$$x = y - y_0 \quad (2.12)$$

Независна променљива се мења од 0 до $x_k = 1 - y_0$.

Заменом вредности у једначинама добијамо:

$$\psi = \kappa_1(y_0 + x) + \kappa_1\lambda_1(y_0 + x)^2$$

Пошто су:

$$\begin{aligned} \psi_0 &= \kappa_1 y_0 + \kappa_1 \lambda_1 y_0^2 \\ \sigma_0 &= 1 + 2\lambda_1 y_0 \end{aligned}$$

Уз ознаку [7]:

$$k_1 = \kappa_1 \sigma_0 \quad (2.13)$$

слиди израз за прорачун променљиве ψ :

$$\psi = \psi_0 + k_1 x + \kappa_1 \lambda_1 x^2 \quad (2.14)$$

Дељењем израза једначине кретања пројектила и брзине сагоревања барута, добија се:

$$\varphi m \frac{dv}{dy} = S_c I_k$$

одатле је:

$$\int_0^v dv = \frac{S_c I_k}{\varphi m} \int_{y_0}^y dy$$

Коначни израз за брзину пројектила је:

$$v = \frac{S_c I_k}{\varphi m} \int_{y_0}^y dy \quad (2.15)$$

Из једначина кретања пројектила и брзине пројектила добија се:

$$p S_c dX = \varphi m v dv$$

а из једначине биланса енергије:

$$p S_c (X_\psi + X) = f_b \varphi m m_b \left(\psi - \frac{v^2}{v_{lim}^2} \right)$$

Дељењем ове две једначине добија се:

$$\frac{dx}{X_\psi X} = \frac{\varphi m}{f_b m_b} \frac{v dv}{\psi - \frac{v^2}{v_{lim}^2}}$$

Увођењем параметра Дроздова:

$$B = \frac{S_c^2 I_k^2}{\varphi m f_b m_b} \quad (2.16)$$

$$B_1 = \frac{B}{2} (k - 1) - \kappa_1 \lambda_1 \quad (2.17)$$

добија се:

$$\frac{dX}{X_\psi + X} = \frac{Bx dx}{\psi_0 + k_1 x - B_1 x^2}$$

Односно:

$$\frac{dX}{X_\psi + X} = -\frac{B}{B_1} \frac{x dx}{x^2 - \frac{k_1}{B_1} x - \frac{\psi_0}{B_1}} \quad (2.18)$$

Десна страна израза се лако интегрише. Међутим са леве стране јавља се поред пута пројектила још једна променљива X_ψ која је у функцији од ψ односно x . Да би се упростио израз рачуна се средња вредност за ψ преко следеће једначине:

$$\psi_s = \frac{\psi + \psi_0}{2} \quad (2.19)$$

На основу овога се рачуна средња вредност за X_ψ :

$$X_{\psi_s} = \frac{1}{S_c} \left[W_0 - \frac{m_b}{\rho_b} - m_b \left(\alpha - \frac{1}{\rho_b} \right) \psi_s \right] \quad (2.20)$$

Због логаритамских функција које се јављају приликом решавања једначине уводи се интеграл са десне стране:

$$\ln Z = \int_0^x \frac{x dx}{x^2 - \frac{k_1}{B_1} x - \frac{\psi_0}{B_1}} \quad (2.21)$$

Разломак под интегралом се може приказати као сума два разломка:

$$x^2 - \frac{k_1}{B_1} x - \frac{\psi_0}{B_1} = \frac{A_1}{x - x_1} + \frac{A_2}{x - x_2} \quad (2.22)$$

где су:

$x_{1,2}$ – корени квадратне формуле;

$A_{1,2}$ – одређене константе.

Увођењем следећих ознака добија се:

$$\gamma = \frac{B_1}{k_1^2} \psi_0 \quad (2.23)$$

$$\delta = \sqrt{1 + 4\gamma} \quad (2.24)$$

Добија се:

$$x_1 = \frac{k_1}{2B_1} (1 - \delta) \quad (2.25)$$

$$x_2 = \frac{k_1}{2B_1} (1 + \delta) \quad (2.26)$$

Постоји услов да је $A_1 + A_2 = 1$ и да је $-A_1 x_2 - A_2 x_1 = 0$. Решавањем овог система једначина добија се:

$$A_1 = \frac{\delta - 1}{2\delta} \quad (2.27)$$

$$A_2 = \frac{\delta + 1}{2\delta} \quad (2.28)$$

Из израза (2.21) добија се:

$$\ln Z = A_1 \int_0^x \frac{dx}{x - x_1} + A_2 \int_0^x \frac{dx}{x - x_2}$$

Интеграл се након сређивања може приказати као:

$$Z = \left(1 + \frac{2}{\delta - 1} \right)^{\frac{\delta - 1}{2\delta}} \left(1 + \frac{2}{\delta + 1} \right)^{\frac{\delta + 1}{2\delta}} \quad (2.29)$$

где је:

$$\beta = \frac{B_1}{k_1} x \quad (2.30)$$

Заменом (2.21) из (2.18), добија се:

$$\int_0^x \frac{dx}{X+X_{\psi s}} = -\frac{B}{B_1} \ln Z \quad (2.31)$$

односно, након интегрисања добија се израз за прорачун пута пројектила:

$$X = X_{\psi s} (Z^{-B/B_1} - 1) \quad (2.32)$$

Након рачунања X , X_{ψ} , v и ψ добија се притисак барутних гасова:

$$p = \frac{f_b m_b}{S_c} \frac{\psi - \frac{v^2}{v_{lim}^2}}{X + X_{\psi}} \quad (2.33)$$

Максимални притисак барутних гасова се јавља у првом периоду. Услов за максимални притисак барутних гасова добија се из једначине (2.33) стављањем услова:

$$\frac{dp}{dt} = 0; p = p_m; v = v_m; \sigma = \sigma_m; \left(\frac{dX}{dt}\right)_m = v_m; \left(\frac{d\psi}{dt}\right)_m = A\sigma_m p_m$$

па је услов за максимални притисак:

$$X_m = \frac{\kappa_1 \sigma_0}{\frac{Bk}{1 + \left(\alpha - \frac{1}{\rho_b}\right) \frac{p_m}{f_b}} - 2\kappa_1 \lambda_1} \quad (2.34)$$

Прорачун максималног притиска барутних гасова се изводи на следећи начин: претпостави се полазна вредност p_{m0} , са њом се рачуна x_m из (2.34), а затим све променљиве из датих израза до p_{m1} из (2.33). Провери се услов:

$$|p_{m1} - p_{m0}| \leq \varepsilon_r \quad (2.35)$$

где је ε_r жељена грешка рачунања. Уколико се испуни овај услов, свеједно је која ће се вредност усвојити за максимални притисак барутних гасова. У супротном случају, понавља се овај поступак са p_{m1} . Последњи притисак који испуни услов дозвољене грешке, узима се за максимални притисак. Дозвољена грешка је до 5 МПа.

Уколико је потребно израчунати и температуру у цеви, израз за њу се добија из основне једначине унутрашње балистике (50) [7] и то овако:

$$T = T_m \left(1 - \frac{B\theta}{2\psi} x^2\right) \quad (2.36)$$

2.3. Други период

У другом периоду се наставља кретање пројектила под дејством притиска барутних гасова, а барутни гасови се шире у простору иза пројектила. Ово се одвија све док пројектил не напусти уста цеви. Полазни подаци су: $\psi=1$, v_k , X_k , p_k . Крајњи подаци су: v_0 , X_u , p_u .

Ширење барутних гасова се одвија по адијабатском закону па важи релација:

$$pW^k = p_k W_k^k \quad (2.36)$$

Слободне запремине су:

$$W = W_0 - \alpha m_b + S_c X$$

$$W_k = W_0 - \alpha m_b + S_c X_k$$

Уводи се ознака:

$$(X_{\psi})_{\psi=1} = X_1 = \frac{1}{S_c} (W_0 - \alpha m_b) \quad (2.37)$$

па је:

$$W = S_c (X + X_1)$$

$$W_k = S_c (X_k + X_1)$$

Преко овога се добија прорачун за притисак барутних гасова:

$$p = p_k \left(\frac{X_k + X_1}{X + X_1} \right)^k \quad (2.38)$$

Израз за брзину пројектила је:

$$v = v_{\text{lim}} \sqrt{1 - \left(\frac{X_k + X_1}{X + X_1} \right)^{k-1} \left(1 - \frac{v_k^2}{v_{\text{lim}}^2} \right)} \quad (2.39)$$

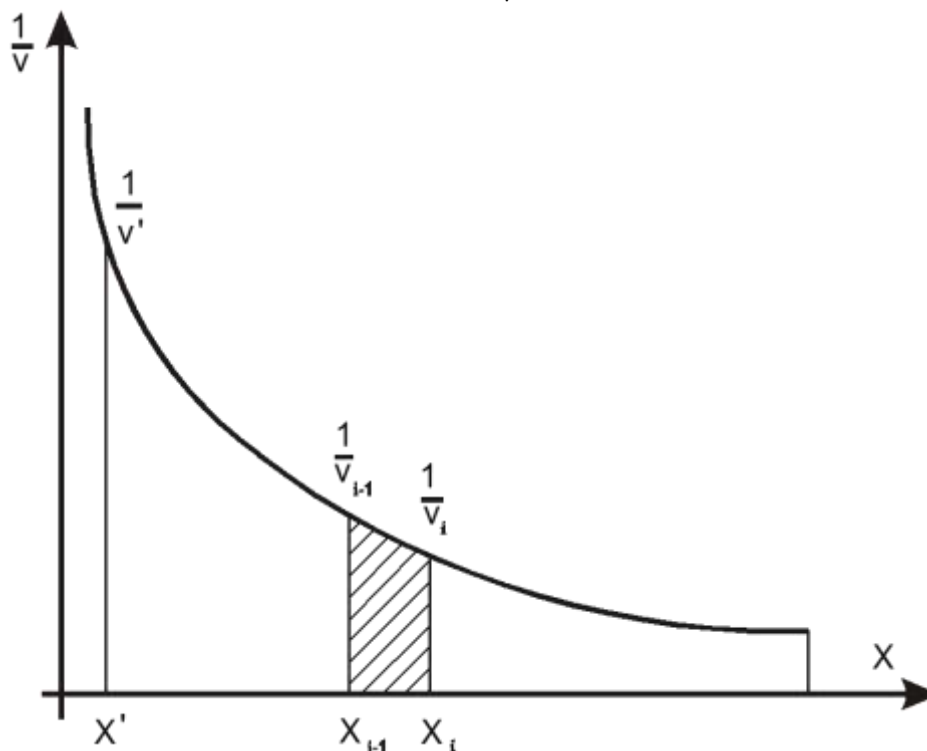
Израз за температуру је:

$$T = T_m \left(1 - \frac{v^2}{v_{\text{lim}}^2} \right) \quad (2.40)$$

2.4. Прорачун времена

Из дефиниције брзине пројектила може да се напише:

$$t = \int_0^X \frac{1}{v} dX \quad (2.41)$$



Слика 2.1. Прорачун времена

Из претходног израза и слике 2.1. види се да је време кретања пројектила једнако површини испод криве $1/v$, с тим да на почетку кретања због $v=0$ није дефинисана вредност $1/v$. Ако се узме

неки пут пројектила X' за који постоји вредност брзине v' и ако је одговарајуће време t' , тада се претходни израз (2.41) може написати у облику:

$$t = t' + t'' \quad (2.42)$$

и

$$t'' = \int_{X'}^X \frac{1}{v} dX \quad (2.43)$$

Време t'' се може одредити планиметрисањем по трапезном правилу:

$$\left(\frac{1}{v}\right)_s = \frac{\frac{1}{v_i} + \frac{1}{v_{i-1}}}{2} \quad (2.44)$$

$$\Delta t_i = \left(\frac{1}{v}\right)_s (X_i - X_{i-1}) \quad (2.45)$$

$$t_i = t_{i-1} + \Delta t_i \quad (2.46)$$

Почетно време t' се одређује на следећи начин. Интервал X' треба изабрати тако да се без велике грешке функција притиска може апроксимирати линеарном функцијом. Тада се једначина кретања пројектила (2.2) трансформише у:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{S_c}{\varphi m} \left(p_0 + \frac{p' - p_0}{t'} t \right)$$

Двоструком интеграцијом добија се:

$$v = \frac{S_c}{\varphi m} \left(p_0 t + \frac{p' - p_0}{t'} \frac{t^2}{2} \right)$$

$$X = \frac{S_c}{\varphi m} \left(p_0 \frac{t^2}{2} + \frac{p' - p_0}{t'} \frac{t^3}{6} \right)$$

Дељењем ова два израза и стављањем услова за крај првог интервала $X = X'$, $v = v'$ и $t = t'$, добија се:

$$t' = \frac{3X' p_0 + p'}{v' 2p_0 + p'} \quad (2.47)$$

Овај израз је познат под називом једначина Бравина.

За планиметрисање по времену се обично узимају тачке прорачуна помоћу којих су цртане криве $v = f_1(X)$ и $p = f_2(X)$. Вредности у првој тачки узимају се за v' , X' и p' помоћу којих се рачуна t' . Након овога, могу да се нацртају зависности $v = \varphi_1(t)$, $p = \varphi_2(t)$ и $X = \varphi_3(t)$.

2.5. Одређивање параметара новог средства

Ново оруђе се конструише на основу постојећег топа „Видра“. Карактеристике противавионског топа М86 „Видра“ су дате у табели 2.1. „Видра“ је приказана на слици 2.2. Балистичке карактеристике противавионског топа М86 „Видра“ су приказане у табели 2.2.

Табела 2.1. Карактеристике противавионског топа 30 mm M-86 „Видра“ [17]

M-86	
Калибар (mm)	30
Муниција (mm)	30x192
Систем рада	Гасни, аутоматски
Храњење	1 реденик
Маса (kg)	205, цев 60
Дужина канала цеви (m)	1,91
Максимални притисак барутних гасова (Pa)	300000000
Сила трзања (N)	25000
Ход затварача (m)	0,044
Почетна брзина пројектила (m/s)	1050-1120
Каденца (мет/мин)	550 / 650
Врста муниције	Тренутно фугаста, обележавајућа, пробојна, пробојно обележавајућа, школска, школско обележавајућа



Слика 2.2. Борбено возило пешадије M80A1 и противавионски топ 30 mm M86 „Видра“ [18]

Табела 2.2. Карактеристике противавионског топа 30 mm M86 „Видра“

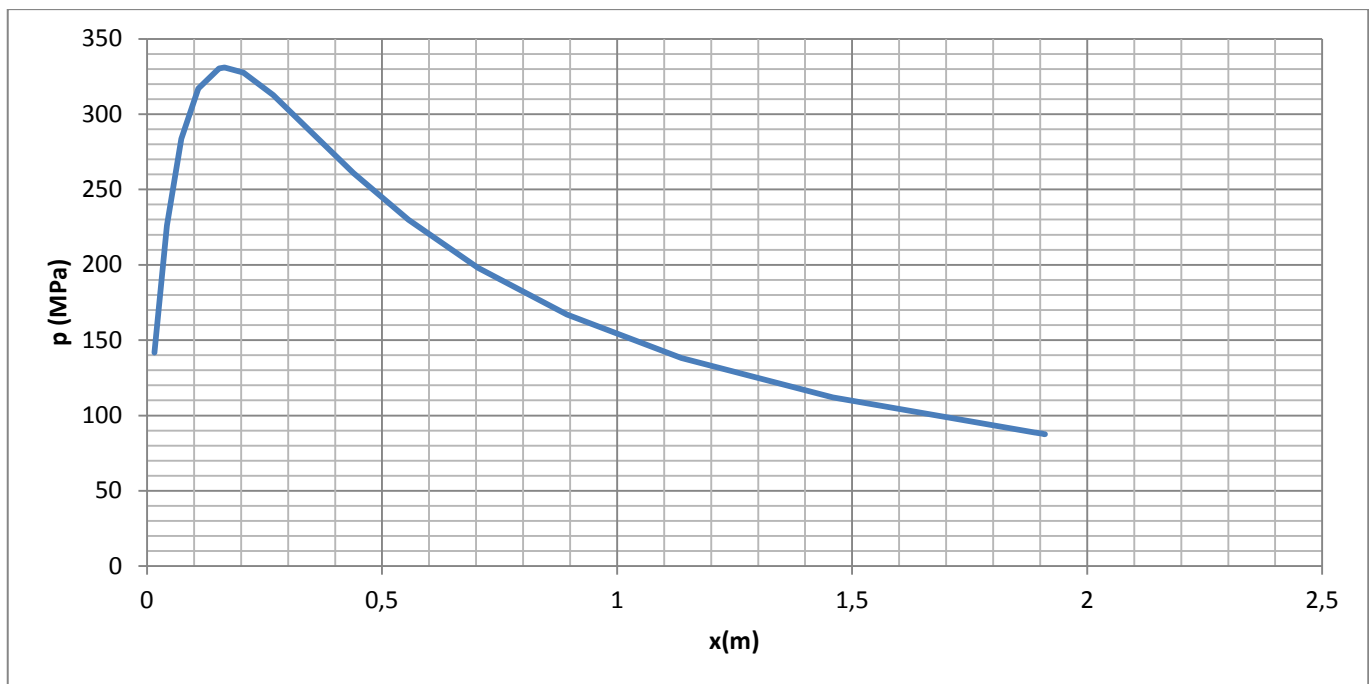
Назив	Ознака	Вредност	Јединица
Почетна запремина барутне коморе	W_0	0,000245	m^3
Попречни пресек цеви	S_c	0,000729	m^2
Укупни пут пројектила у цеви	X_u	1,91	m
Коефицијент фиктивности	Φ	1,19	-
Маса пројектила	M	0,36	kg
Маса барута	m_b	0,19	kg
Специфични рад барутних гасова	f_b	1024470	J/kg
Запреминска маса барута	ρ_b	1580	kg/m ³
Коволумен барутних гасова	A	0,00109	m ³ /kg
Однос специфичних топлота умањен за 1	Θ	0,265	-
Притисак форсирања	p_0	30000000	Pa
Јединична брзина сагоревања барута	u_{z0}	$6,83 \cdot 10^{-10}$	m/(sPa)
Коефицијент облика	κ_1	1,17612	-
Коефицијент облика	λ_1	-0,14975	-
Половина дебљине барутног зрна	r_0	0,00045	mm

Барут који се користи за барутно пуњење је нитроцелулозни барут са ознаком NC-39. Резултати унутрашње балистичког прорачуна за полазне податке противавионског топа 30 mm M86 су дати у табели 2.3.

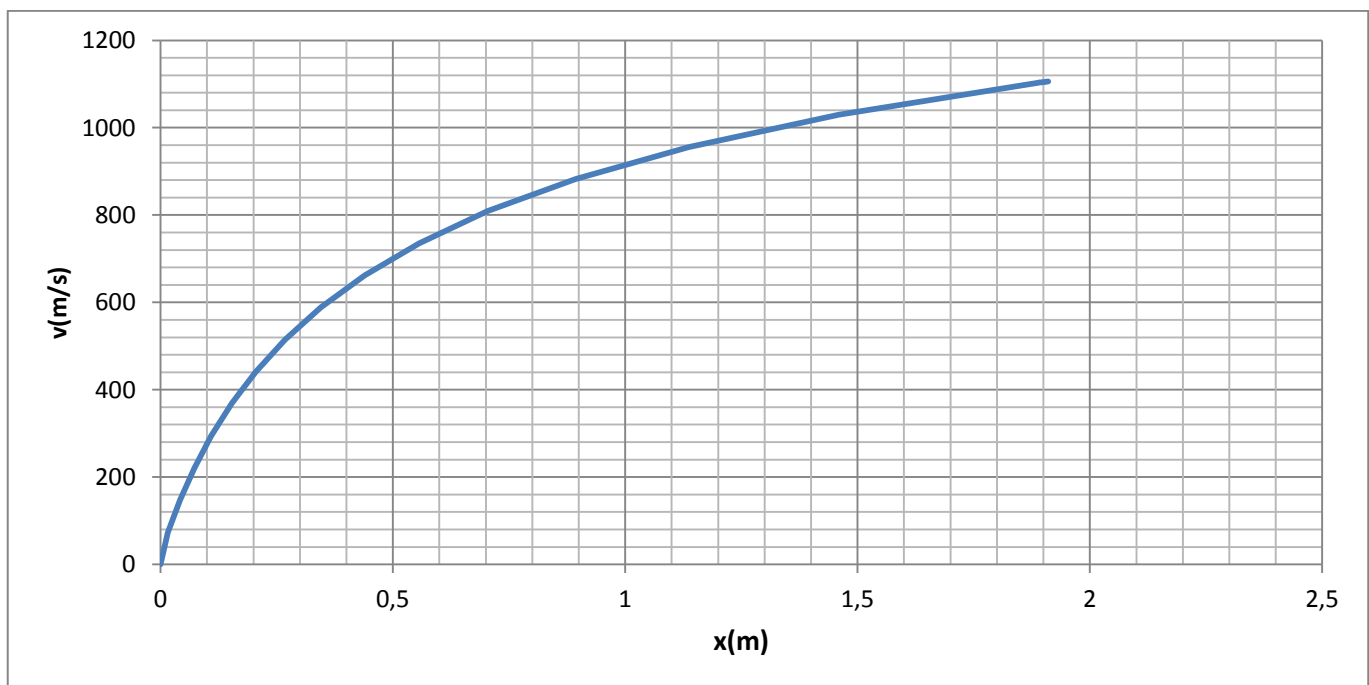
Табела 2.3. Резултати УБ прорачуна добијени програмским решењем DROZD

ПРЕТХОДНИ ПЕРИОД						
y ₀ =0,01617		Ψ ₀ =0,01897		σ ₀ =0,99516		
ПРВИ ПЕРИОД						
l	σ ₀	Ψ	v(m/s)	x(m)	p(MPa)	t(s)
1.	0,081759	0,094981	73,54	0,016	141,669	0,00056
2.	0,147348	0,169475	147,07	0,042	226,072	0,00082
3.	0,212936	0,242453	220,61	0,073	283,529	0,001
4.	0,278525	0,313916	294,14	0,109	316,977	0,00115
5.	0,344114	0,383863	367,68	0,153	330,261	0,00128
PM	0,360242	0,400831	385,76	0,165	330,911	0,00131
6.	0,409702	0,452296	441,21	0,205	327,497	0,00141
7.	0,475291	0,519213	514,75	0,268	312,686	0,00154
8.	0,54088	0,584614	588,29	0,345	289,469	0,00168
9.	0,606468	0,6485	661,82	0,439	260,986	0,00183
10.	0,672057	0,710871	735,36	0,556	229,825	0,002
11.	0,737646	0,771727	808,89	0,704	198,023	0,00219
12.	0,803234	0,831067	882,43	0,893	167,112	0,00242
13.	0,868823	0,888892	955,96	1,137	138,176	0,00268
14.	0,934411	0,945202	1029,5	1,459	111,923	0,00301
15.	1	0,999996	1103,04	1,889	88,7531	0,00341
ДРУГИ ПЕРИОД						
l	x(m)	v(m/s)	p(MPa)	t(s)		
16	1,891	1103,32	88,6319	0,00341		
17	1,893	1103,61	88,511	0,00341		
18	1,895	1103,9	88,3905	0,00342		
19	1,897	1104,18	88,2702	0,00342		
20	1,9	1104,47	88,1502	0,00342		
21	1,902	1104,75	88,0305	0,00342		
22	1,904	1105,04	87,9111	0,00342		
23	1,906	1105,32	87,792	0,00343		
24	1,908	1105,6	87,6731	0,00343		
25	1,91	1105,88	87,5546	0,00343		

Притисак барутних гасова је приказан на слици 2.3. и у функцији је пута пројектила у цеви, а промена почетне брзине у односу на пређен пут је приказан на слици 2.4.



Слика 2.3. Промена притиска у зависности од пута пројектила у цеви

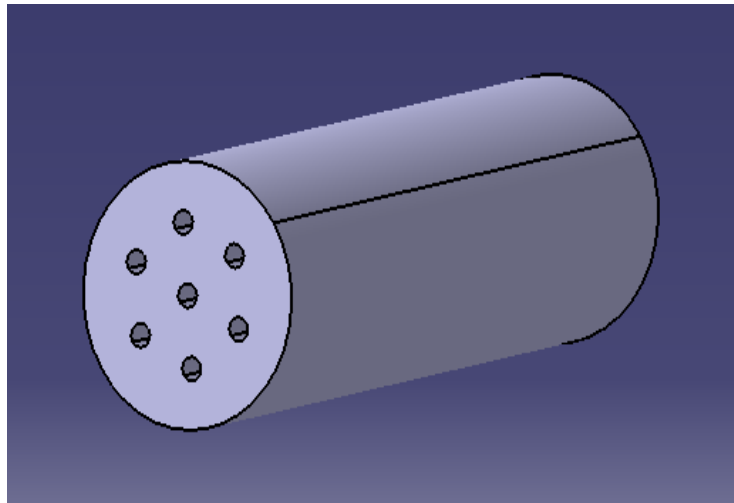


Слика 2.4. Промена брзине у зависности од пута пројектила у цеви

На сликама 2.3. и 2.4. је приказана зависност притиска барутних гасова и брзине пројектила у односу на време које је потребно да би пројектил напустио уста цеви, добијеног преко програмског решења „DROZD“.

У програмском решењу „DROZD“ користио се барут који има основу круг са једним каналом, док барути коришћени у програмском решењу Рунге-Кута (налазе се у електронском прилогу) имају

основу круг са седам канала и сагоревају прогресивно. Користе се због свог прогресивног сагоревања, а за разлику од барута са једним каналом, њихово сагоревање је брже и мањи је несагореви део барута у првом периоду. Барути са седам канала су домаће производње, а искоришћени су на основу литературе [20]. Изабрани су различити барути да би се на основу њихових карактеристика добили што бољи улазни подаци, као што су већа почетна брзина, или



мањи максимални притисак барутних гасова и да би се на основу тих карактеристика изабрао барут који ће заменити постојеће барутно пуњење.

Изглед барутног зрна у 3D је дат на слици 2.3, а урађен је у програму CATIA.

Димензије барутног зрна су:

- дужина барутног зрна L ;
- пречник каналића d ;
- растојање између два каналића $2r_0$;
- пречник барутног зрна D .

Карактеристике барута су дате у табели 2.4:

Слика 2.5. Изглед барутног зрна

Табела 2.4. Остале карактеристике барута

Ознака барута	Средство	W_a	D	d	L
		m	m	m	m
NC-32	ПА топ 25 mm M40	0,0007	0,0035	0,00025	0,005
NC-36	ПАВ топ 57 mm	0,0006	0,003	0,00025	0,015
NC-42	АТ 23 mm ГШ-23Л	0,0044	0,0023	0,00016	0,0031
NC-53	ПАВ топ 37 mm M39	0,0077	0,0048	0,00029	0,0105

Коефицијенти облика се одређују према облику и димензијама барутног зрна. Односи димензија барутног зрна су:

$$\beta = \frac{2r_0}{2c} \quad (2.48)$$

$$\gamma_1 = \frac{D+7d_0}{2c} \quad (2.49)$$

$$\gamma_2 = \frac{D^2-7d^2}{(2c)^2} \quad (2.50)$$

Коефицијенти облика за трочлану формулу за израчунавање релативне сагореле масе и сагоревајуће површине су:

$$\kappa = \frac{\gamma_2+2\gamma_1}{\gamma_2} \beta \quad (2.51)$$

$$\lambda = \frac{6-2\gamma_1}{\gamma_2+2\gamma_1} \beta \quad (2.52)$$

$$\mu = - \frac{6}{\gamma_2 + 2\gamma_1} \beta^2 \quad (2.53)$$

Користећи двочлану формулу се може написати:

$$\psi_1 = \kappa_2 \gamma_1 (1 + \lambda_2 \gamma_1) \quad (2.54)$$

$$\psi = \psi_1 + \kappa_2 (\gamma - 1) [1 + \lambda_2 (\gamma - 1)] \quad (2.55)$$

$$\sigma = 1 + 2\lambda_2 (\gamma - 1) \quad (2.56)$$

Коефицијенти облика се одређују из (2.55) и (2.56), уз услове за крај сагоревања $u = u_k$, $\psi = 1$, $\sigma = 0$:

$$\lambda_2 = - \frac{1}{2(\gamma_k - 1)} \quad (2.57)$$

$$\kappa_2 = \frac{2(1 - \psi_1)}{\gamma_k - 1} \quad (2.58)$$

Варирање важних параметара се врши да би се утврдио њихов утицај на две најважније карактеристике сваког оружја/оруђа, а то су максимални притисак барутних гасова и почетна брзина пројектила на устима цеви. Важно је изабрати вредности које неће довести до непотпуног сагоревања барута. Циљ варирања је да се добије што мањи притисак барутних гасова, а да почетна брзина, уколико је то могуће буде што већа. Тако ће бити изабране оптималне вредности које ће дефинисати будуће оруђа. Вредности које ће се мењати кроз прорачун су:

- укупан пут пројектила у цеви x_u ;
- јединична брзина сагоревања барута u_{z0} ;
- специфичан рад барутних гасова f_b ;
- коволумен барутних гасова α .

Последње три карактеристике су балистичке карактеристике барута.

Јединична брзина сагоревања u_{z0} је константа из закона сагоревања барутног зрна и једначина је [2]:

$$u_z = u_{z0} \rho \quad (2.53)$$

Јединична брзина сагоревања барута за нитроцелулозне баруте износи од $5,5 \cdot 10^{-10}$ m/sPa до $8 \cdot 10^{-10}$ m/sPa, а за нитроглицеринске баруте од $4 \cdot 10^{-10}$ m/sPa до $12 \cdot 10^{-10}$ m/sPa [1].

Специфичан рад барутних гасова представља рад који би извршили барутни гасови настали сагоревањем 1 kg барута ако се хладе до 0°C и шире при атмосферском притиску. Једначина која се користи за израчунавање специфичног рада барутних гасова је:

$$f_b = MRT_m \quad (2.54)$$

где су:

M – укупан број молова гасне смеше;

R – универзална гасна константа;

T_m – максимална температура барутних гасова.

Коволумен барутних гасова је најмања запремина на коју се могу сабити барутни гасови настали сагоревањем 1 kg барута. Одређује се експериментом или термохемијским прорачуном.

Једначине су:

$$f_b = \left(6546 + \frac{3,401}{4,187} Q_w \right) 10^2 \quad (2.55)$$

$$\alpha = \left(1456 - \frac{0,524}{4,187} Q_w \right) 10^{-6} \quad (2.56)$$

$$U_{z0} = \left(-76,6 + \frac{0,179}{4,187} Q_w \right) 10^{-11} \quad (2.57)$$

Табела са вредностима Q_w и карактеристикама барута је дата у наставку.

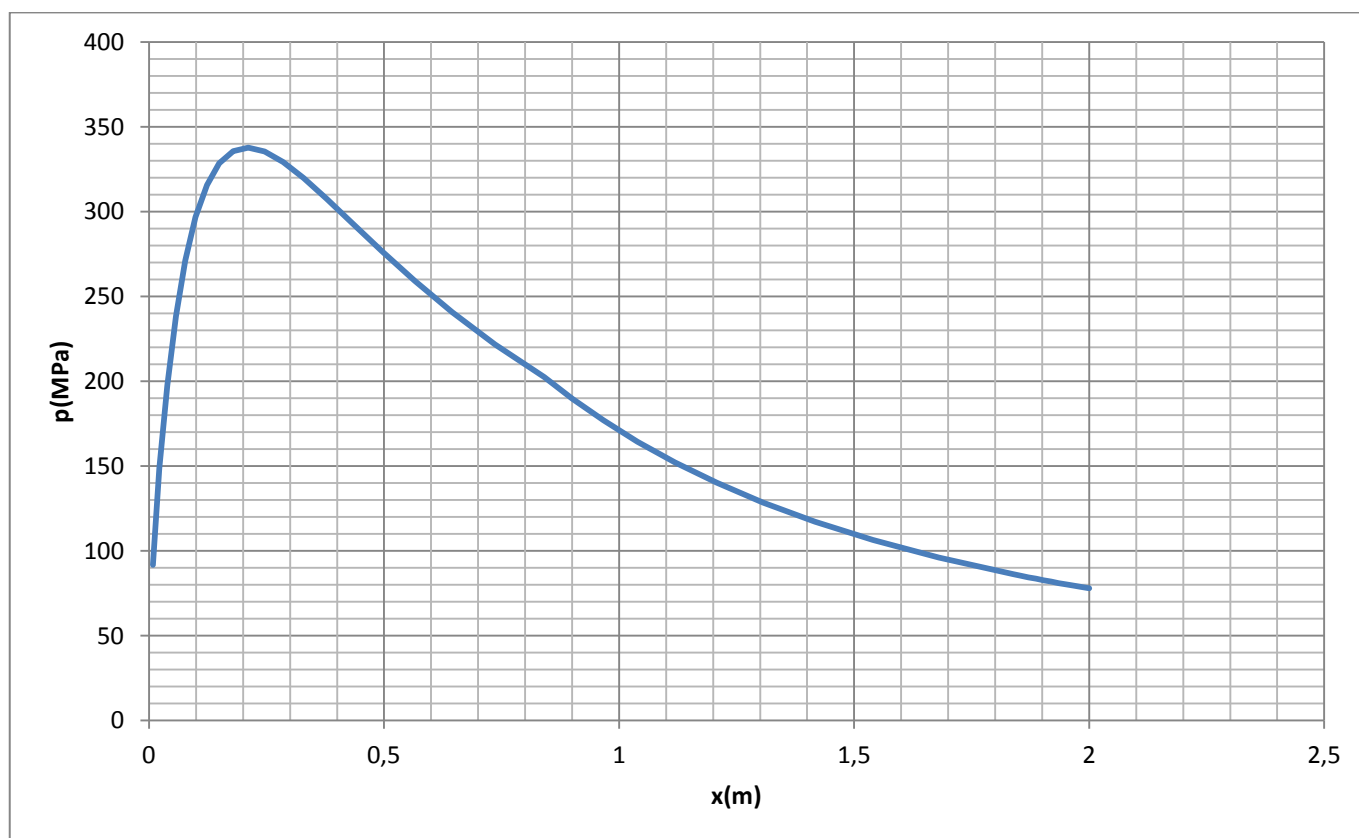
Табела 2.5. Ознака и карактеристике барута

Ознака барута	Q_w	α	f_b	u_{z0}
NC-32	4103	0,000942	987877	$9,88 \cdot 10^{-10}$
NC-36	4019	0,000953	981054	$9,51 \cdot 10^{-10}$
NC-42	3663	0,000997	952137	$8 \cdot 10^{-10}$
NC-53	3914	0,000966	972525	$9,1 \cdot 10^{-10}$

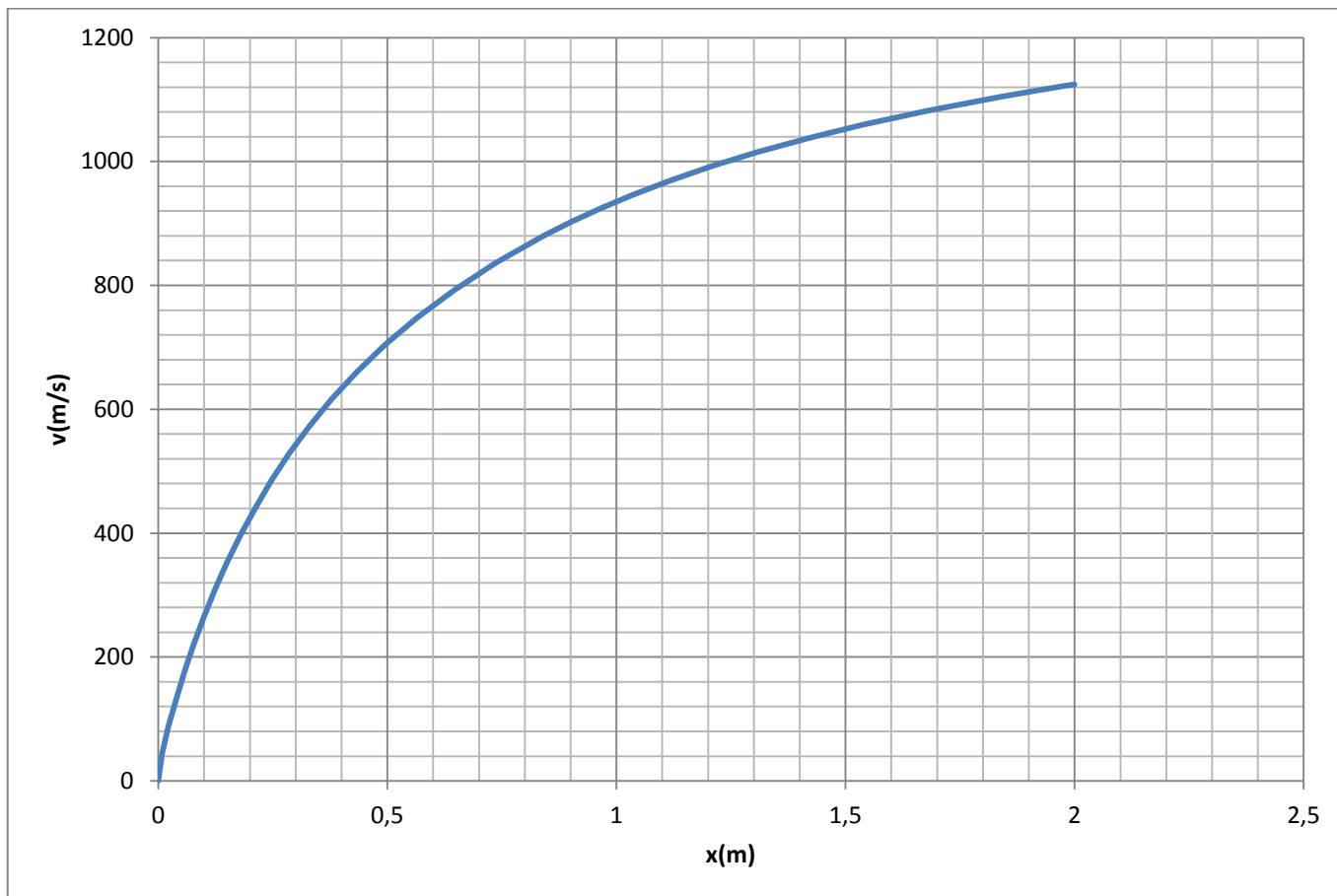
Након решавања једначина, добијају се карактеристике барута које су биле тражене, а након тога и почетна брзина пројектила на устима цеви и максимални притисак барутних гасова у цеви, на основу програмског решења JKMKUT.FOR. Резултати су приказани у табели 2.6.

Табела 2.6. Максимални притисак барутних гасова и почетна брзина пројектила у односу на барут

Врста барута	NC-32	NC-36	NC-39	NC-42	NC-53
Карактеристике					
Максимални притисак (МПа)	310,3	341,1	331	350,8	337,6
Почетна брзина (m/s)	1025	986	1105	968	1124



Слика 2.6. Промена притиска у зависности од пута пројектила у цеви



Слика 2.7. Промена брзине у зависности од пута пројектила у цеви

Мењање укупног пута пројектила у цеви доводи до продужења или смањења цеви оруђа. Варирање дужине пута пројектила у цеви је од 1,9 m до 2,1m, а зависност почетне брзине у односу на промену дужине пута пројектила у цеви је приказана у табели 2.7.

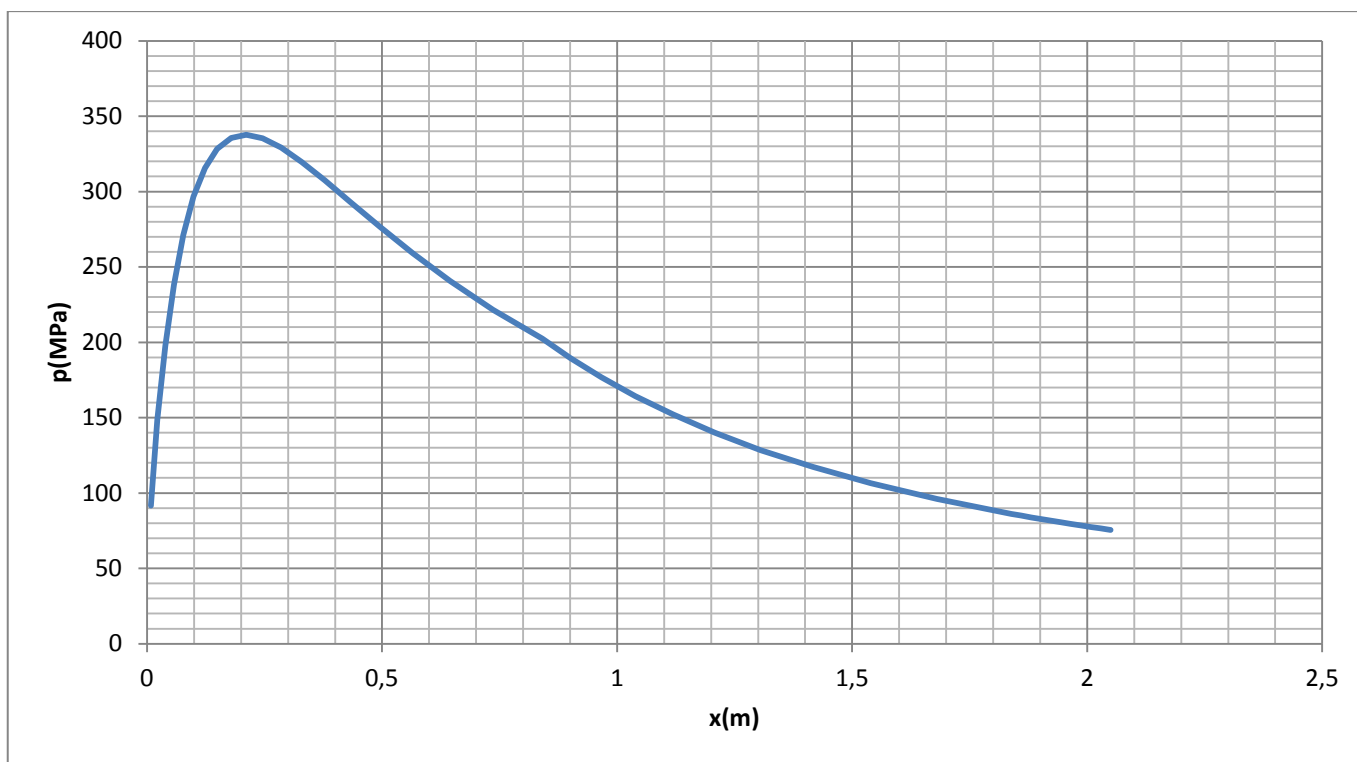
Табела 2.7. Почетна брзина пројектила у зависности од пута пројектила у цеви

x_u (m)	1,9	1,95	2	2,05	2,1
v (m/s)	1112,42	1118,64	1124,64	1130,42	1136

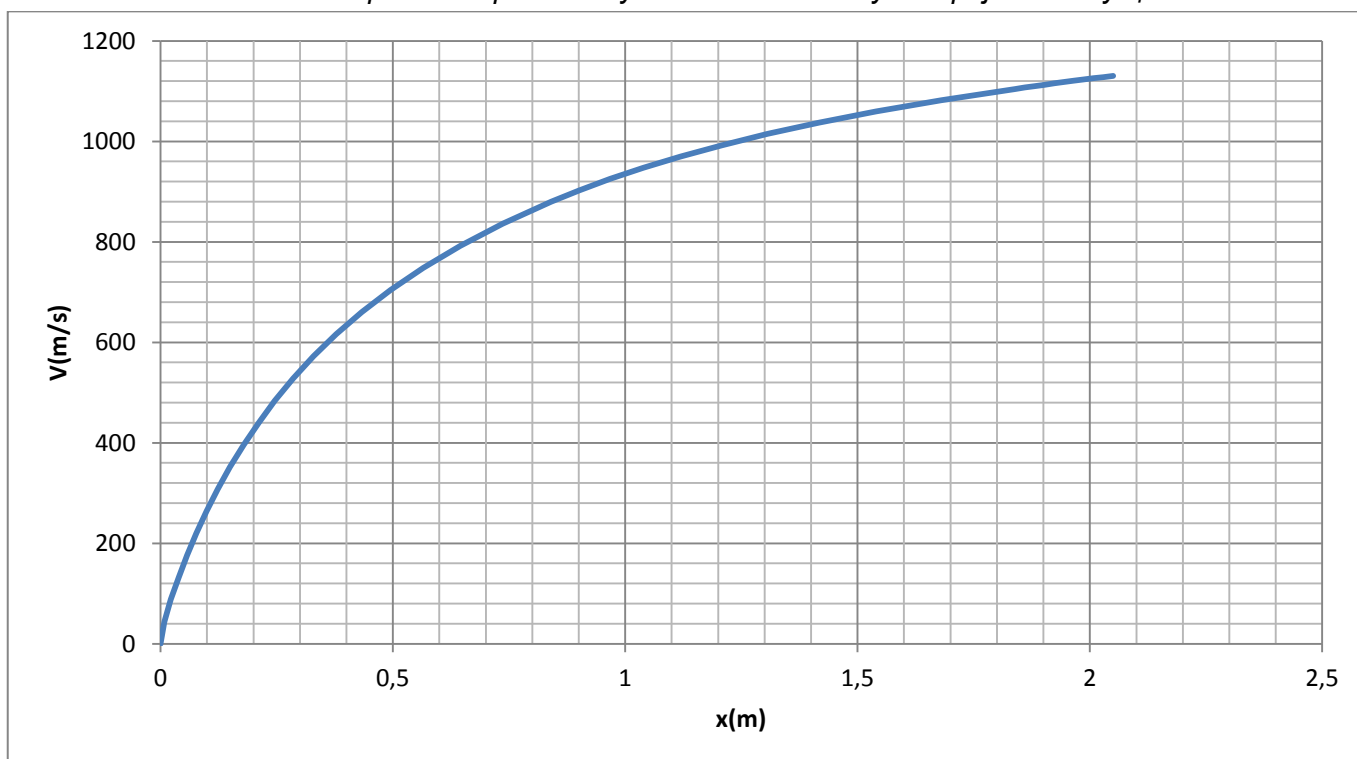
За оптимално решење је изабрана дужина пута пројектила у цеви од 2,05 m. Оптимално решење добијено програмским решењем „JKMKUT“ за барут NC-53 и дужину пута пројектила у цеви је приказано у табели 2.8.

Табела 2.8. Резултати УБ прорачуна добијени програмским решењем Ругне-Кута за барут NC-53

ПРЕТХОДНИ ПЕРИОД					
y ₀ =0,01952		Ψ ₀ =0,01904		σ ₀ =1,00100	
ПРВИ ПЕРИОД					
l	Ψ	v(m/s)	x(m)	p(MPa)	t(s)
1	0,060348	44	0,008	91,5697	0,0005
2	0,105118	88,01	0,022	148,719	0,0007
3	0,151041	132,01	0,039	197,531	0,0009
4	0,197955	176,01	0,057	238,1986	0,001
5	0,245695	220,02	0,077	271,1152	0,0011
6	0,294099	264,02	0,099	296,7637	0,0012
7	0,343003	308,03	0,123	315,6755	0,0013
8	0,392243	352,03	0,149	328,4109	0,0013
9	0,441657	396,03	0,179	335,5469	0,0014
10	0,491081	440,04	0,211	337,6671	0,0015
11	0,540352	484,04	0,246	335,3539	0,0016
12	0,589307	528,04	0,285	329,1812	0,0016
13	0,637781	572,05	0,329	319,7078	0,0017
14	0,685613	616,05	0,378	307,4714	0,0018
15	0,732637	660,05	0,433	292,9833	0,0019
16	0,778692	704,06	0,495	276,725	0,002
17	0,823614	748,06	0,565	259,1437	0,0021
18	0,867239	792,07	0,645	240,651	0,0022
19	0,909404	836,07	0,736	221,6205	0,0023
20	0,949946	880,07	0,841	202,3877	0,0024
Друга фаза					
21	0,959457	902,51	0,901	189,5449	0,0025
22	0,967966	924,95	0,967	176,8348	0,0026
23	0,975474	947,39	1,039	164,3174	0,0026
24	0,981981	969,83	1,119	152,0481	0,0027
25	0,987487	992,27	1,208	140,0778	0,0028
26	0,991991	1014,71	1,306	128,453	0,0029
27	0,995495	1037,15	1,417	117,2157	0,003
28	0,997998	1059,59	1,54	106,4034	0,0031
29	0,999499	1082,03	1,68	96,04957	0,0033
30	1	1104,47	1,839	86,18314	0,0034
ДРУГИ ПЕРИОД					
l	x(m)	v(m/s)	p(MPa)	t(s)	
31	1,86	1107,25	84,99572	0,0034	
32	1,881	1109,99	83,83729	0,0034	
33	1,902	1112,69	82,70682	0,0035	
34	1,923	1115,34	81,60336	0,0035	
35	1,944	1117,95	80,52598	0,0035	
36	1,965	1120,52	79,47382	0,0035	
37	1,987	1123,05	78,44602	0,0035	
38	2,008	1125,54	77,44177	0,0036	
39	2,029	1128	76,46032	0,0036	
40	2,05	1130,42	75,50091	0,0036	



Слика 2.8. Промена притиска у зависности од пута пројектила у цеву



Слика 2.9. Промена брзине у зависности од пута пројектила у цеву

3. КОНСТРУИСАЊЕ ЦЕВИ

Улога цеви је да обезбеди сигурно и поуздано опаљење метка, вођење пројектила (балистичко вођење) и лансирање пројектила.

Цев се састоји из три дела:

- лежишта метка;
- прелазног конуса;
- водишта пројектила.

Цев, у зависности од њене намене, као и од облика пројектила може имати ожлебљено или глатко водиште.

Главни захтев који се поставља пред цев је да се из цеви калибра d при опаљењу пројектила масе m , саопшти почетна брзина v_0 .

Цев која се конструише мора да издржи напрезања и силе које делују на њу за време опаљења. Постоје два типа цеви која се користе данас, а то су:

- неојачана – моноблок цев;
- ојачана – састављива цев.

Неојачана цев се израђује од једног комада. Она је једноставна по конструкцији и економична је за производњу. Недостатак је тај да се приликом истрошености канала цеви, цела цев мора заменити. Оне се користе код оруђа малог и средњег калибра, јер се развојем металургије и технолошке израде дошло до високолегираних челика који се користе за цев, а самим тим и до побољшања механичких карактеристика и издржљивости од неколико хиљада опаљења.

Ојачане цеви су оне у чијим зидовима је пре опаљења унешено преднапонско стање напрезања, због повећања укупне еластичне отпорности цеви. Састављиве цеви са једним или више цилиндара се називају вишеслојне цеви. Код њих се унутрашњи слој назива цев, а спољни омотач.

Слободне цеви су настале из разлога да се истрошене цеви које не задовољавају задате балистичке захтеве замене или обнове. Замењива цев је слободна цев.

3.1. Спољна траса цеви

Спољна траса цеви се добија на основу криве притиска у цеви и материјала за израду цеви применом теорија отпорности цеви.

Отпорност цеви се одређује преко највећег напрезања и деформација у цеви које настају као последица притиска барутних гасова, који се стварају након опаљења. Сви експерименти су доказали да су напрезања и деформације неравномерно распоређене по дужини канала цеви и да зависе од притиска који расте од дна пројектила према дну цеви.

Приликом сагоревања барутних зрна долази до стварања барутних гасова који стварају велики притисак у цеви, а тиме и радијална и тангенцијална напрезања у цеви. Притисци се у појединим пресецима мењају од p_d до p_m . Једначина према релацији Сароа је [4]:

$$p_d = p_m \left(1 + 0,5 \frac{m_b}{m} \right) \quad (3.1)$$

или према релацији Слухоцког у облику:

$$p_d = p_m \left(1 + 0,55 \frac{m_b}{m} \right) \left(\frac{d}{d_k} \right)^{0,6} \quad (3.2)$$

где су:

- m_b – укупна маса барута;
- m – маса пројектила;
- d – калибар оруђа;
- d_k – највећи пречник коморе;
- p_m – максимални притисак барутних гасова.

Претпоставке које се усвајају при прорачуну отпорности цеви су [4]:

- Притисак барутних гасова је равномерно распоређен у каналу цеви и симетричан је у односу на осу канала цеви;
- Цев има цилиндричан облик пре и после опаљења;
- Материјал од којег је израђена цев је хомоген и изотропан;
- Честице материјала су под дејством оптерећења у равнотежи.

Ове претпоставке се не могу испунити у пракси јер материјал који се користи за израду цеви одступа од идеалног хомогеног и изотропног. Многобројни фактори одступају од нормалних величина што доводи до варијација максималног притиска и при опаљењу долази до загревања цеви и тиме до смањења њене отпорности.

3.2. Еластична отпорност моноблок цеви

Еластична отпорност представља све отпорности које неки материјал може да издржи, а да не дође до промене његовог облика. Ако притисак представимо као p_{1gr} , па се еластична отпорност дефинише као гранични притисак коју цев може да издржи.

Постоје разне теорије чврстоће као што су [4]:

- Критеријум највећих нормалних напрезања;
- Критеријум највећих линеарних деформација;
- Критеријум највећих тангенцијалних напрезања;
- Критеријум енергије промене облика.

Критеријум највећих нормалних напрезања је најстарија теорија чврстоће код које пластична деформација, или лом материјала наступа у случају када највеће главно напрезање достигне вредност границе еластичности материјала. Ова теорија је примењива само за крте материјале, где је утицај других напрезања занемарљив [4].

Критеријум највећих линеарних деформација – почетак пластичних деформација настаје када највећа вредност линеарне деформације достигне границу еластичне деформације [4].

Критеријум највећих тангенцијалних напрезања - пластичне деформације настају када највеће смицање у зиду цеви достигне величину граничног напрезања [4].

Критеријум енергије промене облика је новија теорија потенцијалне енергије деформације. По њој пластично стање настаје када потенцијална енергија јединичне запремине материјала пређе граничну вредност специфичне енергије деформације.

Еластична отпорност моноблок цеви је [4]:

$$p_{1gr}^{IV} = \sigma_e \frac{r_2^2 - r_1^2}{\sqrt{3r_2^4 + r_1^4}} \quad (3.3)$$

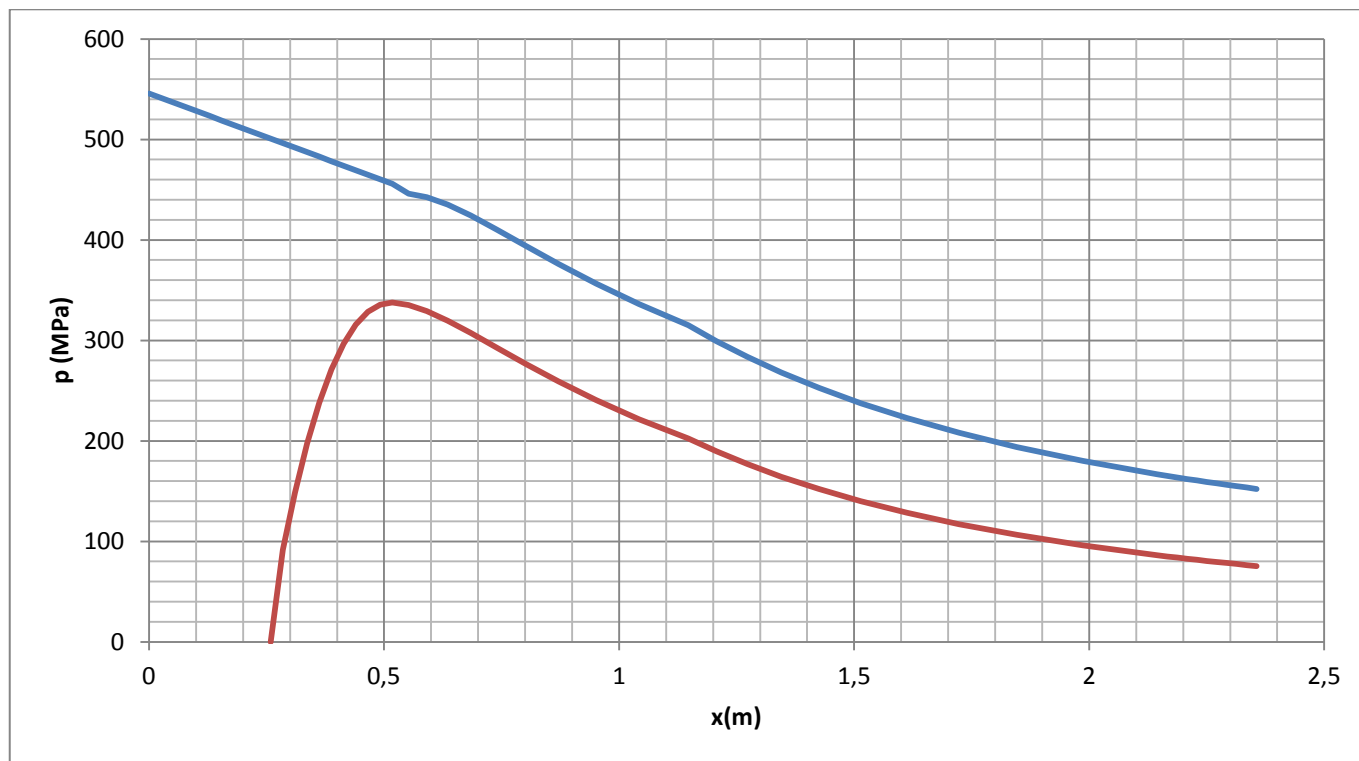
$$r_2 = r_1 \sqrt{\frac{1 + p_1 \sqrt{4 - 3p_1^2}}{1 - 3p_1^2}} \quad (3.4)$$

где је:

$$p_1 = \frac{p_{1gr}^{IV}}{\sigma_e} \quad (3.5)$$

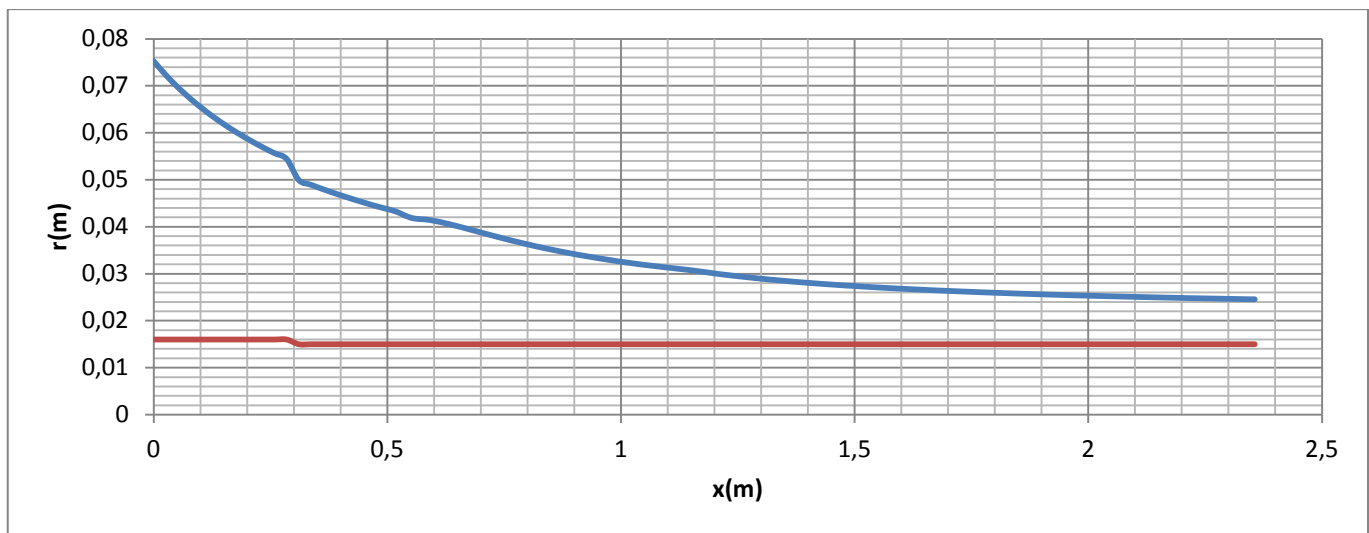
На основу УБ прорачуна, максимални притисак је позната величина. Програмско решење у коме се ради прорачун за димензионисање цеви се зове „KODCEV.FOR”.

На слици 3.1. се види конструкциона крива притиска и кривуља максималног притиска барутних гасова.



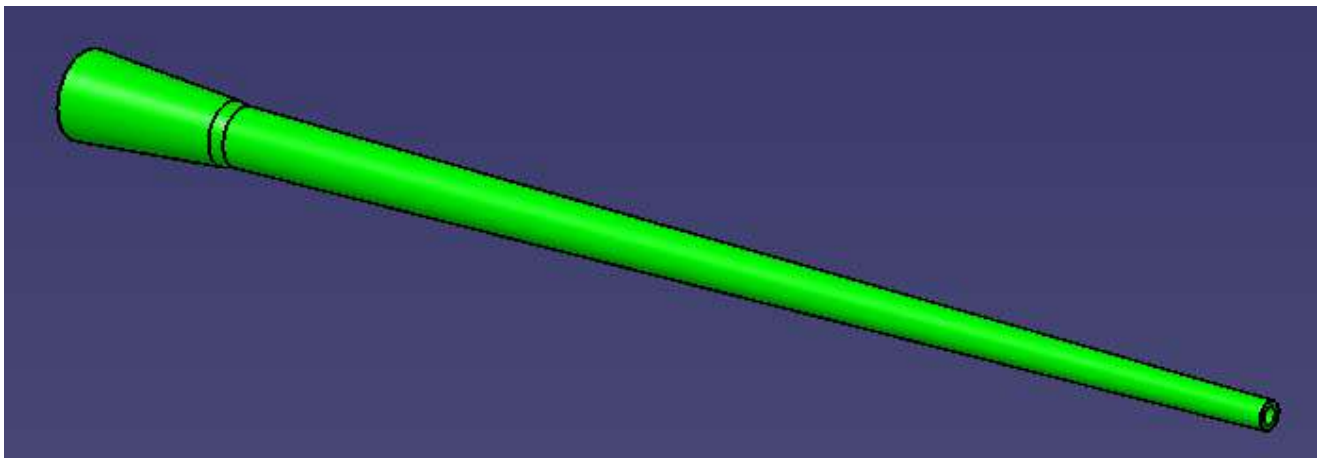
Слика 3.1. Промена притиска од дужине цеви

У складу са конструкционом кривом притиска са одговарајућим коефицијентом сигурности дата је зависност промене спољашњег пречника цеви:



Слика 3.2. Промена пречника од дужине цеви

Цев се на основу добијених димензија пројектује у софтверу CATIA. 3D изглед цеви је приказан на слици 3.3.



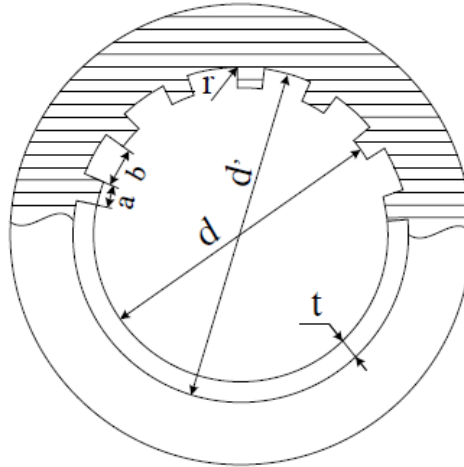
Слика 3.3. Моделована цев 30mm

3.3. Унутрашња траса цеви

Унутрашња траса цеви се односи на ожлебљено водиште пројектила по коме се креће пројектил. Жлебови цеви се увијају с лева у десно. Постоје разни типови жлебова као што су [2]:

- правоугаони;
- трапезни;
- полигонални облик.

Најчешће се примењује правоугаони облик, који ће се и у овом случају применити, а приказан је на слици 3.4.



Слика 3.4. Олучено водиште пројектила

Ознаке на слици су:

- a – ширина поља;
- b – ширина жлеба (олука);
- d – растојање између два дијаметрално супротна поља;
- d' – растојање између два дијаметрално супротна жлеба;
- r – прелазни радијус са бока на олуку;
- t – дубина олука, односно висина поља.

Када се бирају елементи и профили жлебова, треба водити рачуна о лако урезивању водећег прстена и добром вођењу пројектила, што доводи до контрадикције, јер добро вођење захтева већи број жлебова и већу дубину, док добро урезивање водећег прстена захтева мању дубину и мањи број жлебова. Такође, због материјала који се користи за водећи прстен (бакар), ширина водећег прстена мора бити већа од ширине поља у цеви до 3 пута.

При конструисању унутрашњости цеви код којих је почетна брзина већа од 900 m/s усваја се услов да је $2a > b > a$.

Једначина за дубину поља је:

$$t = 0.02 d \quad (3.6)$$

За избор броја жлебова n се користи израз:

$$n = (3.5 \div 4) d \quad (3.7)$$

Број жлебова одређује ширину поља и жлебова преко следеће једначине:

$$a + b = \frac{d\pi}{n} \quad (3.8)$$

За оруђа код којих је брзина пројектила на устима цеви већа од 1000 m/s се усваја однос између ширине жлебова и поља на следећи начин:

$$(a + b) = 1 \text{ cm} \quad (3.9)$$

где се β креће у границама од 1,1 до 1,7.

Усвојена вредност броја жлебова је:

$$n = 12;$$

Усвојена вредност ширине поља и жлебова је:

$$a + b = 0,78 \text{ cm};$$

$$a = 0,0026 \text{ m};$$

$$b = 0,0052 \text{ m};$$

Дубина поља цеви је:

$$t = 0,6 \text{ mm};$$

Из једначине:

$$r = t \quad (3.10)$$

$$r = 0,6 \text{ mm};$$

Растојање између два дијаметрално супротна жлеба се добија помоћу следеће једначине:

$$d' = d + 2t \quad (3.11)$$

његова вредност је:

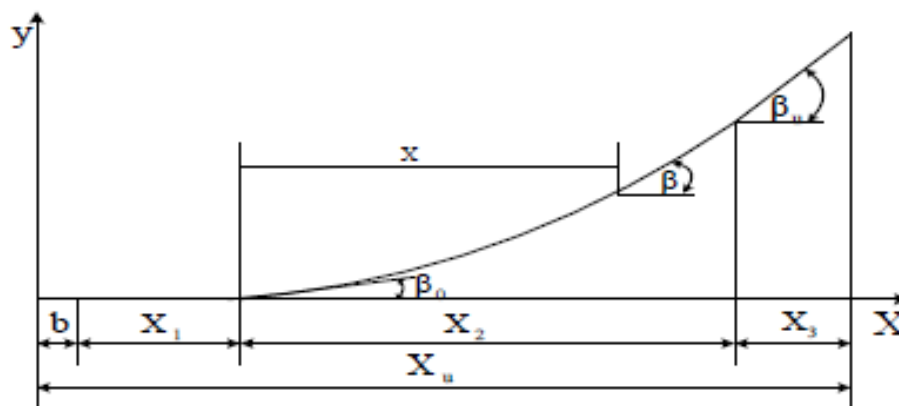
$$d' = 31,2 \text{ mm};$$

Постоје три типа ожлебљених цеви које се примењују у пракси. То су:

- са константним углом увијања;
- са прогресивним углом увијања;
- са комбинованим углом увијања.

Код цеви са константним углом увијања, корак увијања је исти како на почетку тако и на крају и због тога долази до хабања цеви, поготово у пределу прелазног конуса где долази до урезивања водећег прстена пројектила у цев оруђа. Због тога је много повољније користити прогресивни угао увијања. Угао увијања је у почетку мали и креће се у границама од 0° до 3° - 4° .

Угао увијања ће почети са 0° и постепено ће расти. На овај начин се смањује утицај смицања водећег прстена, тамо где пројектил достиже највеће убрзање. Онда креће прогресивно увијање цеви до дужине од $4d$ до уста цеви, где угао увијања постаје константан. На слици 3.5 је приказан начин увијања жлебова у цеви.



Слика 3.5. Зависност угла увијања од пређеног пута пројектила

Дужина ожлебљеног дела цеви је:

$$X_{oz} = X_u - b \quad (3.12)$$

где су:

$X_u = 2,05 \text{ m}$ —укупни пут пројектила у цеви;

$b = 0,021 \text{ m}$ — дужина пројектила иза водећег прстена.

Дужина ожлебљеног дела цеви је:

$$X_{oz} = 2,029 \text{ m};$$

Дужина првог сектора је:

$$X_1 = X - b \quad (3.13)$$

$$X_1 = 0,033 \text{ m};$$

Дужина другог сектора је:

$$X_2 = X_{oz} - X_1 - 4d \quad (3.14)$$

$$X_2 = 1,876 \text{ m};$$

Дужина трећег сектора је:

$$X_3 = 4d \quad (3.15)$$

$$X_3 = 0,12 \text{ m};$$

Почетна вредност угла увијања се одређује на основу једначине:

$$y = px^2 \quad (3.16)$$

где су:

y – вредност параболе;

p – параметар хиперболе.

Једначина која одређује угао на почетку и на крају увијања је:

$$\operatorname{tg} \beta_0 = 2px_1 \quad (3.17)$$

$$\operatorname{tg} \beta_u = 2px_2 \quad (3.18)$$

Угао увијања на врху цеви је 8° на основу искуствених података, а на почетку увијања се добија на основу формула из методе Дроздова [5]:

$$\beta_0 = (0.21 + 0.65\mu) \beta_u \quad (3.19)$$

где је:

$\mu = p_{sr}/p_m$ – карактеристика бризантности барута;

$p_{sr} = 189 \text{ МПа}$ – средња вредност притиска барутних гасова;

$p_m = 337,67 \text{ МПа}$ – максимални притисак барутних гасова;

На основу ових вредности карактеристика бризантности барута је:

$$\mu = 0,56;$$

Почетни угао увијања је:

$$\beta_0 = 4,59^\circ;$$

Вредност параметра параболе p може се израчунати формулом:

$$p = \frac{\operatorname{tg} \beta_u - \operatorname{tg} \beta_0}{2X_2} \quad (3.20)$$

Вредност параметра p је:

$$p = 1,626 \cdot 10^{-5};$$

Вредност угла увијања може се одредити следећом једначином:

$$\beta = \operatorname{arctg}(2pX) + \beta_0 \quad (3.21)$$

Због жлебова у цеви, пројектил добија угаону брзину која му омогућава стабилност при лету, а у цеви поред трансляторног пројектил добија и ротационо кретање. Једначине које израчунавају угаону брзину и број обртаја дате су у наставку.

$$n = \frac{60v_0}{d\pi} \operatorname{tg} \beta_u \quad (3.22)$$

$$n = 101105 \text{ [o/min]};$$

$$n = 101105 / 60 = 1685 \text{ [o/sec]};$$

Угаона брзина је на основу овога једнака:

$$\Omega = 2\pi n \quad (3.23)$$

$$\Omega = 10587 \text{ [rad/sec];}$$

На основу прорачуна се закључује да пројектил има захтевану стабилност у току лета.

4. КОНСТРУИСАЊЕ МЕТКА

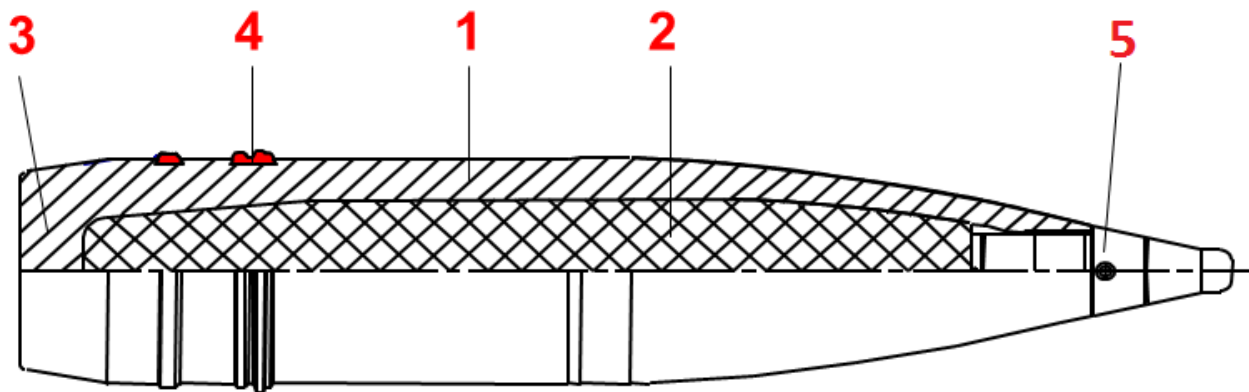
Метак је склоп елемената и механизма, чија правовремена и сигурна међусобна функција омогућава да се из цеви оружја/ оруђа избаци пројектил и постигне одређени ефекат на циљу. С обзиром на тактичко - техничке захтеве (брзо отварање ватре и максимално могућа брзина гађања) и намену оруђа/оружја, метак може бити сједињен, полусједињен и дводелни. Метак као комплет обједињује у једну целину: барутно пуњење, пројектил и чауру. Уобичајени називи за пројектиле стрељачких метака су зрна, а за пројектиле артиљеријских метака гранате. Овде има изузетака на пример пројектил са пуним језгром су панцирна зрна, а не гранате. Суштинска разлика између зрна и гранате је у начину дејства на циљ. Зрно дејствује на циљ кинетичком енергијом, а граната експлозивним пуњењем.

Циљ је пројектовање пројектила са бољим аеродинамичким карактеристикама од постојећег пројектила калибра 30mm, који ће имати мањи отпор ваздуха при свом кретању, и пројектовање чауре у коју треба да се смести барутно пуњење. При пројектовању чауре треба водити рачуна о њеној запремини, да би се сместило барутно пуњење у њу.

Пројектил је целина која се састоји од [3]:

- кошуљице пројектила;
- експлозивног пуњења;
- упаљача;
- водећег прстена.

На слици 4.1. је приказан класичан пројектил.



Слика 4.1. Класичан пројектил [3]

На слици су приказани:

1. кошуљица пројектила;
2. експлозивно пуњење;
3. дно пројектила;
4. водећи прстен;
5. упаљач.

Кошуљица пројектила служи за смештај експлозивног пуњења и упаљача. Она се прави од челика или челичног лива и на циљу има разорно дејство.

Експлозивно пуњење се састоји од различитих врста експлозива. Често се уместо експлозивног пуњења у кошуљицу стављају и пропагандни материјали, материјали за осветљавање средине, биолошке или хемијске материје и др.

Упаљач има улогу да активира експлозивно пуњење. Главне карактеристике упаљача су сигурност и поузданост, а с обзиром на велики број упаљача њихова подела је на [3]:

- механичке;
- темпирне;
- електричне;
- неконтактне и близинске.

4.1. Развој новог пројектила

Након конструисања цеви, следи конструисање пројектила. Циљ конструисања новог пројектила је да се добије мања маса пројектила, јер се тиме добија и већа почетна брзина пројектила. Осим развоја пројектила, развија се и чаура у коју се смешта барутно пуњење, а осим тога она ће бити тако пројектована да се цео метак може сместити у лежиште метка.

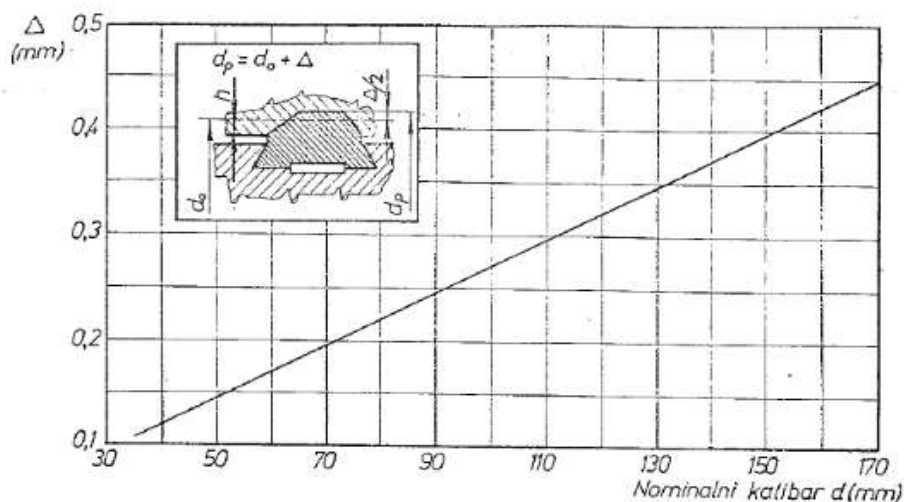
4.1.1. Конструисање водећег прстена

Водећи прстен, урезивањем у жлебове током кретања пројектила кроз цев, омогућује жirosкопску стабилност пројектилу при лету, а поред тога служи и за заптивање цеви и пројектила и недозвољава продирање барутних гасова испред пројектила.

Материјал који се узима за израду водећег прстена је углавном електролитички бакар, јер он има довољну жилавост да издржи све напоре и мање троши цев од других материјала. Поред бакра се користи легура бакра и никла која има већу чврстоћу и жилавост од чистог бакра.

Спољни пречник водећег прстена одређује се на основу једначине [18]:

$$d_p = d_0 + \Delta \quad (4.1)$$

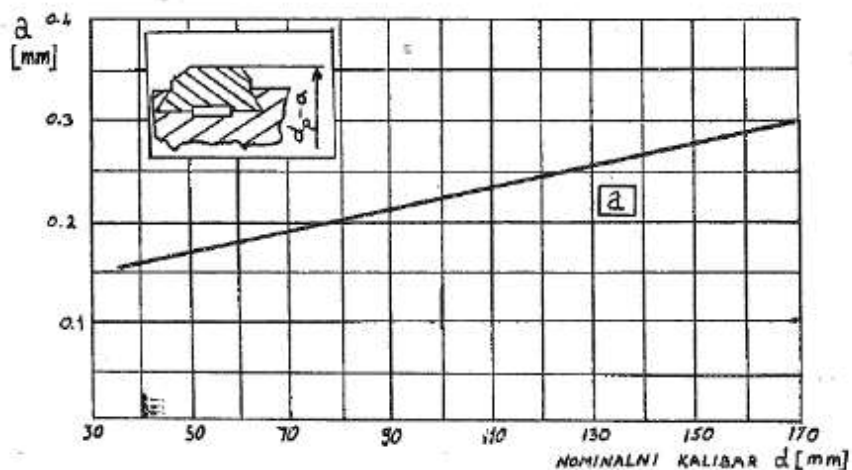


Слика 4.2. Зависност спољног пречника водећег прстена од калибра[18]

На основу слике 4.2. одређују се следеће вредности:

- $d' = 0,0312 \text{ m}$;
- $d = 0,03 \text{ m}$;
- $h = 0,00005 \text{ m}$;
- $\Delta = 0,0001 \text{ m}$;
- $d_p = 0,0302 \text{ m}$.

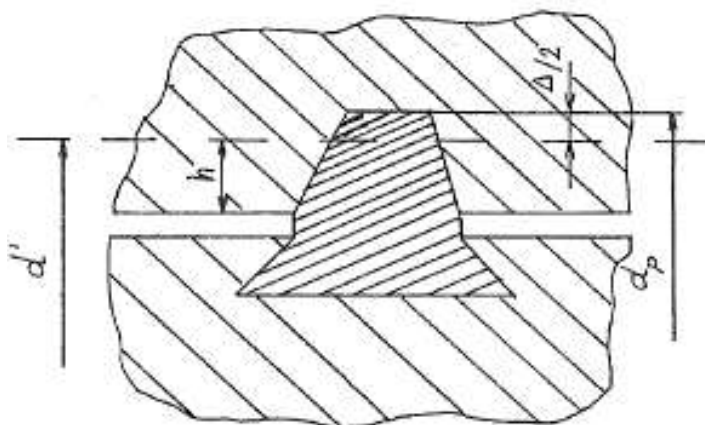
Производне толеранције највећег пречника водећег прстена која је једна од најутицајнијих димензија дата је на слици 4.3.



Слика 4.3. Толеранција водећег прстена [18]

- $a = 0,00015 \text{ m}$;
- $d_{pt} = d_p + a = 0,03035 \text{ m}$.

Шема изгледа водећег прстена је дата на слици 4.4.



Слика 4.4. Скица водећег прстена [18]

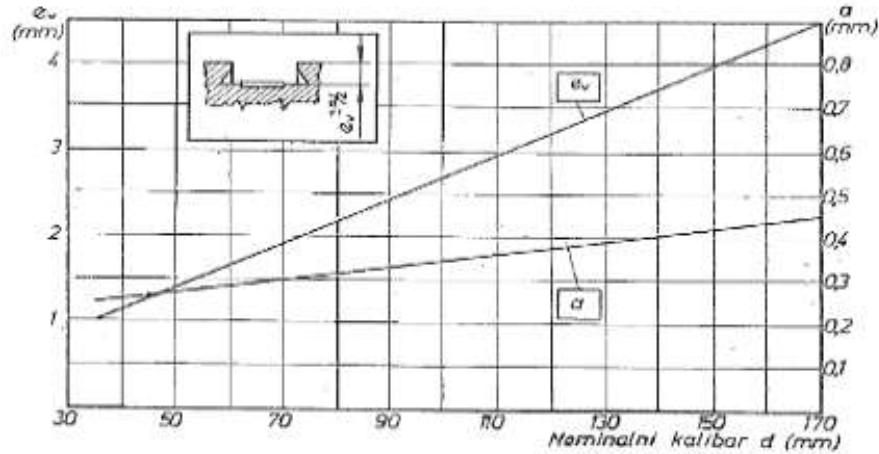
4.1.2. Димензионисање гнезда водећег прстена

Дубина жлеба код савремених пројектила износи [5]:

$$e_v = (0,02-0,03)d \quad (4.2)$$

Усвојена вредност је:

- $e_v = 0,0006 \text{ m}$;



Слика 4.5. Дубина и толеранција жлеба за водећи прстен [18]

$$d_u = d - 2e_v \quad (4.3)$$

- $d_u = 0,0288 \text{ m}$;

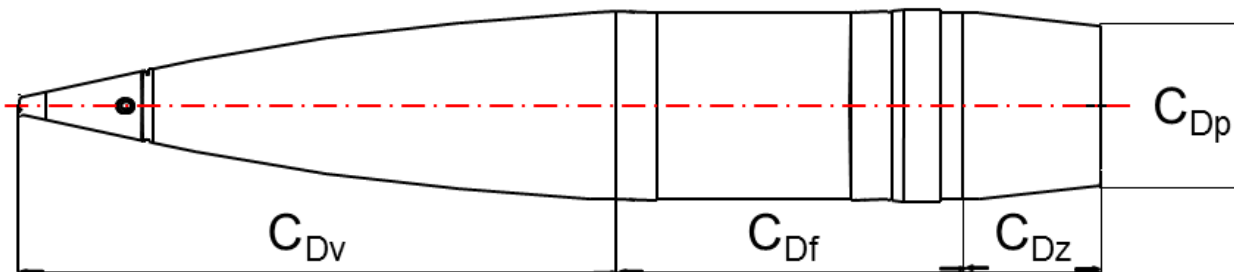
где је d_u пречник пројектила на месту где се уграђује водећи прстен. Ширина водећег прстена је усвојена и износи:

- $H_{vp} = 0,007 \text{ m}$;

4.1.3. Одређивање спољне трасе кошуљице

Спољна траса кошуљице одређује аеродинамичке отпоре који се јављају при лету пројектила.

При конструисању пројектила се ишло ка томе да његов облик омогући што мање аеродинамичке отпоре, односно да обезбеди што већи домет пројектила. Аеродинамички коефицијент C_D рачуна се на следећи начин:

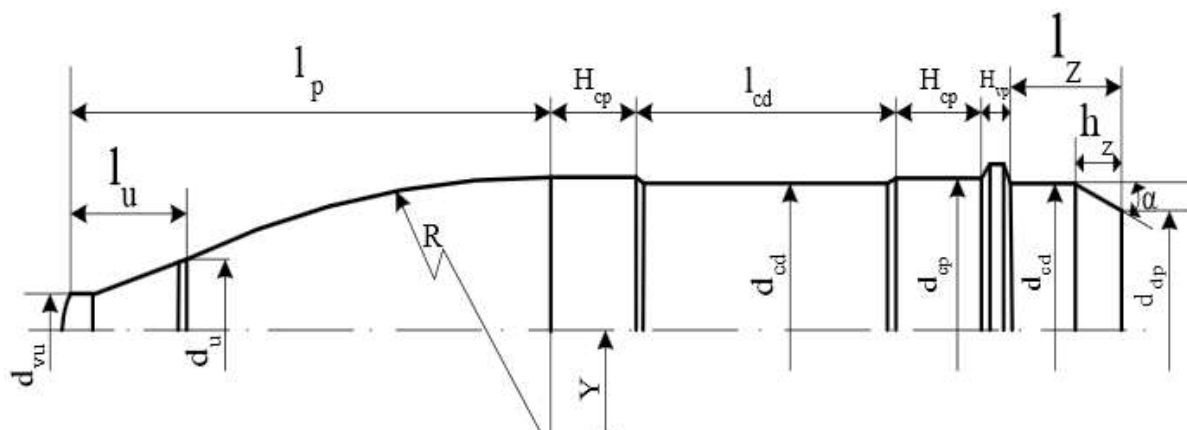


Слика 4.6. Аеродинамички коефицијенти [3]

$$C_D = C_{Dv} + C_{Dp} + C_{Dz} + C_{Df} \quad (4.4)$$

где су:

- C_{Dv} – коефицијент отпора предњег дела;
- C_{Dv} – коефицијент отпора дна пројектила;
- C_{Dz} – коефицијент отпора задњег конуса;
- C_{Df} - коефицијент отпора трења.



Слика 4.7. Спољна траса пројектила[18]

На слици 4.7. приказана је спољна траса пројектила на основу које се конструише кошуљица пројектила.

4.1.4. Трасирање задњег дела пројектила

Задњи део пројектила је део који почиње од завршетка водећег прстена, а завршава се на дну пројектила. Димензионисање задњег дела пројектила се врши према следећим једначинама :

$$l_z/d = 0,7 = 0,021 \text{ m} \quad (4.5)$$

$$h_z/d = 0,5 = 0,015 \text{ m} \quad (4.6)$$

где су:

- l_z – дужина пројектила иза водећег прстена;
- h_z – дужина коничног дела иза водећег прстена.

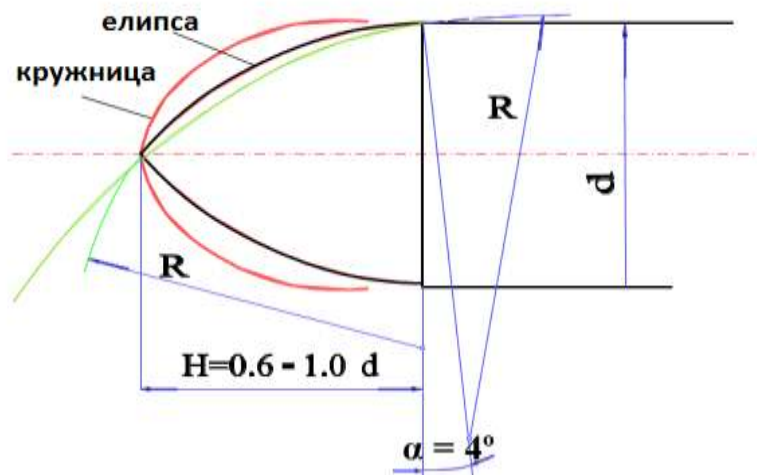
Угао α се креће у границама од 7° до 9° . Где је α угао нагиба конуса и дела иза водећег прстена. Усвојени угао α је 7° .

4.1.5. Трасирање предњег дела пројектила

Вредности отпора ваздуха и аеродинамичких сила које се јављају при кретању пројектила зависе од предњег дела пројектила. Облик предњег дела пројектила зависи и од почетне брзине пројектила, па је облик предњег дела пројектила код подзвучних брзина приказан на слици 4.8. Код надзвучних брзина облик предњег дела има велики утицај на карактеристике струјања кроз који пролази пројектил [3]. Користе се најчешће три облика предњег дела пројектила [3]:

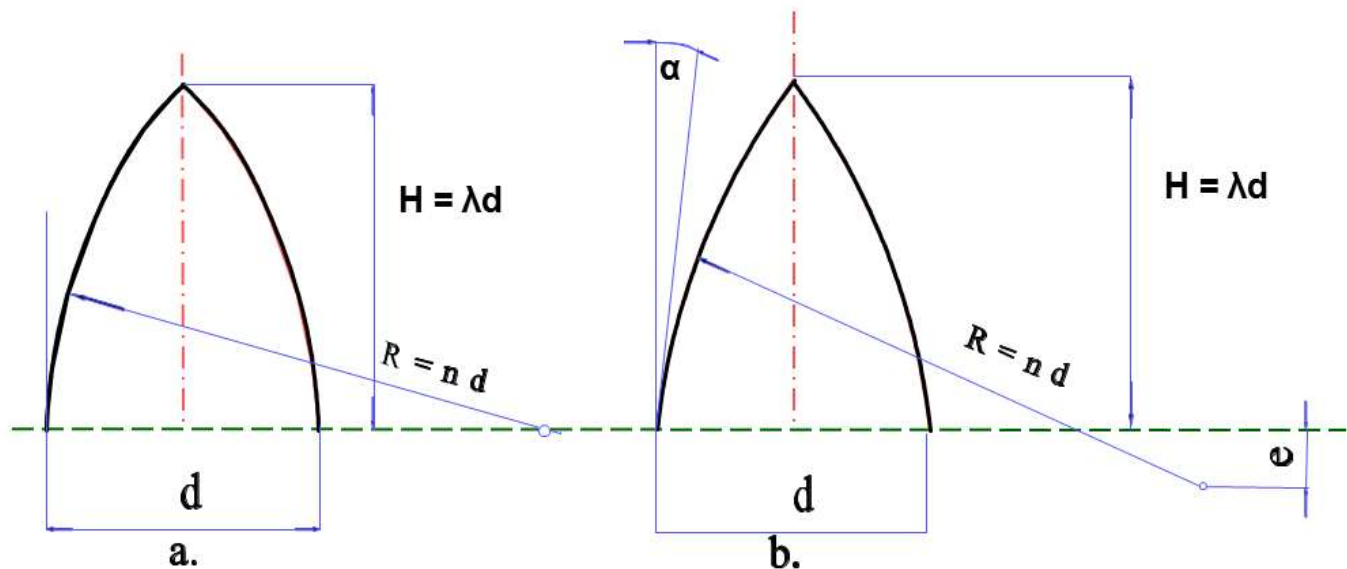
- конусни;

- тангентни;
- секантни.



Слика 4.8. Изглед предњег дела код подзвучних брзина

На слици 4.9. су приказани начини конструисања тангентног и секантног предњег дела.



Слика 4.9. Изглед предњег дела код надзвучних брзина (а – тангентни, б - секантни)

При конструисању пројектила, избор предњег дела зависи од конструктора, а у овом случају изабрано решење је тангентни облик пројектила. Однос укупне дужине предњег дела пројектила и калибра је:

$$l_p/d = (2,2 - 2,6) \quad (4.7)$$

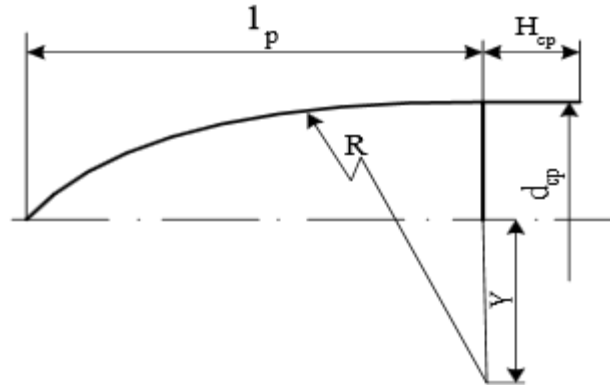
- $l_p = 0,078 \text{ m}$;

Да би се правилно конструисао предњи део пројектила, усваја се већ постојеће решење упаљача који се користи на пројектилу „HEI 30mm M68“. Димензије упаљача су:

- $d_u = 0,011 \text{ m}$ – највећи пречник упаљача;

- $l_u = 0,027 \text{ m}$ - дужина упаљача ван пројектила;
- $l_{up} = 0,02 \text{ m}$ – дужина упаљача који улази у пројектил;
- $d_{vu} = 0,003 \text{ m}$ – пречник врха упаљача;
- $d_{uu} = 0,005 \text{ m}$ – пречник упаљача који улази у пројектил;
- $l_n = 0,014 \text{ m}$ – дужина навојног дела упаљача.

На слици 4.10. је приказан предњи део пројектила тангентног оживала.



Слика 4.10. Предњи део пројектила тангентног оживала [18]

Пречник тангентног оживала се добија из једначине:

$$R^2 = l_p^2 + \left(R - \frac{d}{2}\right)^2 \quad (4.8)$$

- $R = 0,2103 \text{ m}$;

4.1.6. Одређивање унутрашње стране кошуљице пројектила

Када се конструише кошуљица, поред спољних димензија кошуљице, важно је одредити и унутрашње димензије кошуљице, да би она издржала све силе и притиске који се јављају приликом њеног кретања кроз цев. Дебљина кошуљице која се препоручује на месту преласка оживалног дела у цилиндрични, па све до водећег прстена је [18]:

$$\delta = (0,1 - 0,16) d \quad (4.9)$$

- $\delta = 0,003 \text{ m}$ – усвојена вредност дебљине кошуљице;

Пречник унутрашње трасе кошуљице се на преласку цилиндричног у оживални облик одређује на следећи начин [18]:

$$d_i = d - 2\delta \quad (4.10)$$

- $d_i = 0,024 \text{ m}$;

Дужина унутрашњег оживалног дела кошуљице пројектила је [18]:

$$l_{u0} = l_p - l_u - l_n \quad (4.11)$$

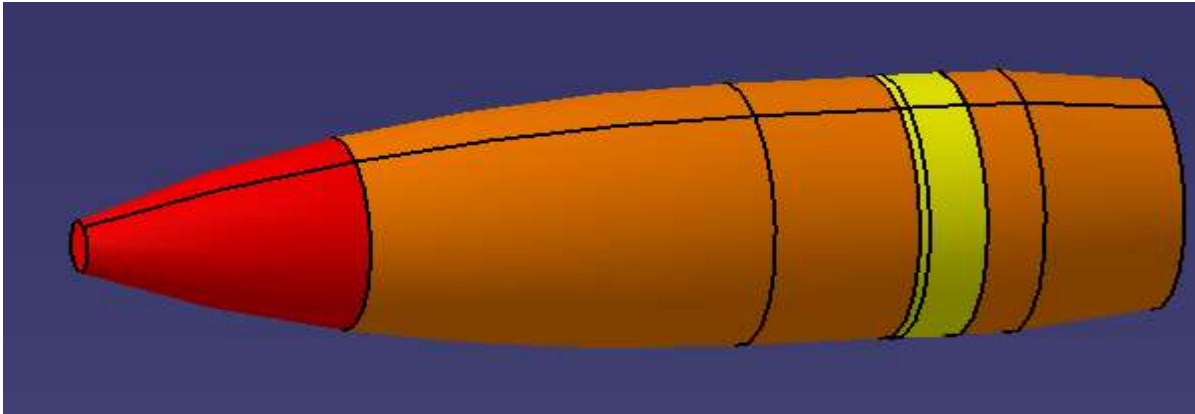
- $l_{u0} = 0,037 \text{ m}$;
- $d_{uu} = 0,005 \text{ m}$;

Као и у случају спољног оживала кошуљице и за унутрашњи оживал је узет тангентни оживал. Одређивање унутрашњег пречника оживала је дат у једначини [18]:

$$R_1^2 = l_{uo}^2 + \left(R_1 - \frac{d_1}{2}\right)^2 \quad (4.12)$$

- $R_1^2 = 0,063 \text{ m}$;

На слици 4.11. је приказан склоп пројектила.



Слика 4.11. Моделовани пројектил 30mm

Сви модели који су конструисани у 3D облику, као и њихови технички цртежи су рађени у програму CATIA V5R19.

4.2. Одређивање масе пројектила

Основе за све даље анализе конструкције пројектила јесте одређивање масе, положаја центра масе и главних момената инерције. У ту сврху се користе следеће методе прорачуна:

- Метода Гобара;
- Таблична метода;
- Таблице за пројектовање;
- Помоћу инжењерских софтвера као што су CATIA, AutoDesk Inventor, PRO ENGINEER и других.

За прорачун масе пројектила се користио инжењерски софтвер CATIA V5R19. Разлика између методе Гобара и табличне методе је у томе што је у методи Гобара корак h константан, а код табличне методе се мења.

Маса пројектила се рачуна као маса његових саставних делова и једначина је:

$$m_p = m_{vp} + m_u + m_e + m_k \quad (4.13)$$

Маса упаљача је:

- $m_u = 0,05 \text{ kg}$;

Маса водећег прстена се рачуна на следећи начин:

$$m_{vp} = \pi(R^2 - r^2)H_{vp}\rho_{vp} \quad (4.14)$$

- $m_{vp} = 0,0054 \text{ kg}$;

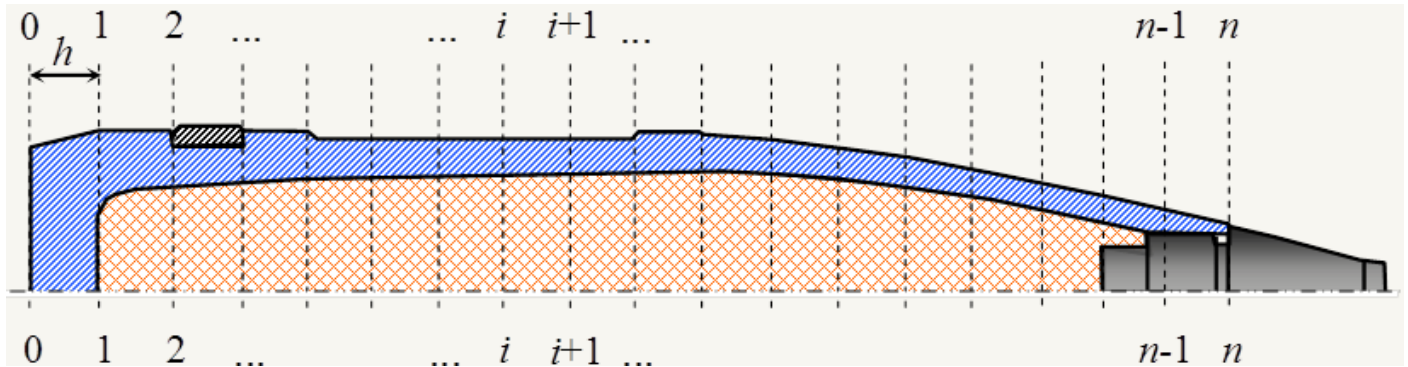
Маса експлозивног пуњења се рачуна преко следеће једначине:

$$m_{e,i} = \pi r_i^2 h_i \rho_i \quad (4.15)$$

Маса кошуљице пројектила се рачуна преко следеће једначине:

$$m_{k,i} = \pi(R_i^2 - r_i^2)h_i \rho_k \quad (4.16)$$

Густина експлозивног пуњења је 1520 kg/m^3 , јер је то густина TNT-а, а кошуљице 7800 kg/m^3 , јер је то густина гранитног челика.



Слика 4.12. Подела пројектила по пољима [5]

Маса пројектила добијена у инжењерском програму CATIA је:

$$m_p = m_{vp} + m_u + m_e + m_k = 5,4 + 50 + 48 + 175 = 0,2784 \text{ kg};$$

Маса пројектила добијена програмским решењем „MASA“ је:

$$m_p = m_{vp} + m_u + m_e + m_k = 5,4 + 50 + 23 + 193 = 0,2711 \text{ kg};$$

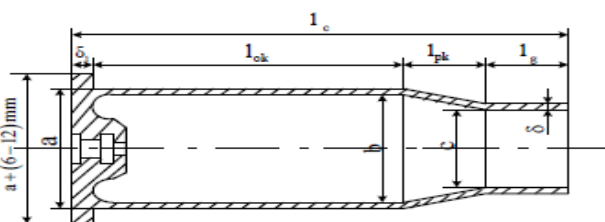
Разлика између маса пројектила добијених програмским решењем „MASA“ и инжењерским програмом CATIA је последица поделе пројектила по пољима, која је потребна да би се попунила улазна датотека за програмско решење „MASA“. С обзиром да прецизност одређивања масе пројектила зависи од броја поља, за овај број поља (20) се не може постићи апсолутна тачност приликом добијања масе. Зато је за масу пројектила узета маса добијена инжењерским програмом „CATIA“.

4.3. Конструисање чауре

Сагоревањем барута и стварањем барутних гасова долази до стварања максималног притиска барутних гасова у цеви и почетне брзине пројектила на устима цеви. Спољни пречник грлића чауре је мањи од пречника водећег прстена. Дебљина грлића чауре се израчунава формулом:

$$\delta = 0,5 (d_{cd} + 2t + 2e - c) \quad (4.17)$$

где су: $e = 0 \div 0,0001 \text{ m}$ – радијална вредност форсмана (усвојена вредност је $0,0001 \text{ m}$).



Слика 4.13. Цртеж чауре

c – унутрашњи пречник грлића у слободном стању чауре (усвојена вредност је $0,0297 \text{ m}$).

Дебљина чауре се повећава према њеном дну па се усваја да је она на дну једнака 2δ . Вредност дебљине чауре је:

$$\delta = 0,0017 \text{ m}$$

Предњи цилиндрични део коморе износи:

$$l_{cd} = (0,3 \div 0,5)d \quad (4.18)$$

Запремина грлића чауре је:

$$w_g = \frac{\pi c^2}{4} l_g \quad (4.19)$$

Вредност запремине цилиндричног дела чауре је:

$$w_g = 0,000001 \text{ m}^3;$$

За унутрашње вредности чауре усвојене су следеће вредности:

$$b = 0,0306 \text{ m};$$

$$l_{ok} = 0,350 \text{ m};$$

Једначина за израчунавање запремине основног цилиндричног дела је:

$$w_{ok} = \frac{\pi b^2}{4} l_{ok} \quad (4.20)$$

Њена вредност је:

$$w_{ok} = 0,0002355 \text{ m}^3;$$

Средњи део чауре је у ствари његов прелазни конус, а његова запремина се рачуна на основу следеће једначине:

$$w_{pk} = \frac{(c^2 + cb + b^2)\pi}{12} l_{pk} \quad (4.21)$$

Њена вредност је:

$$w_{pk} = 0,00000857 \text{ m}^3;$$

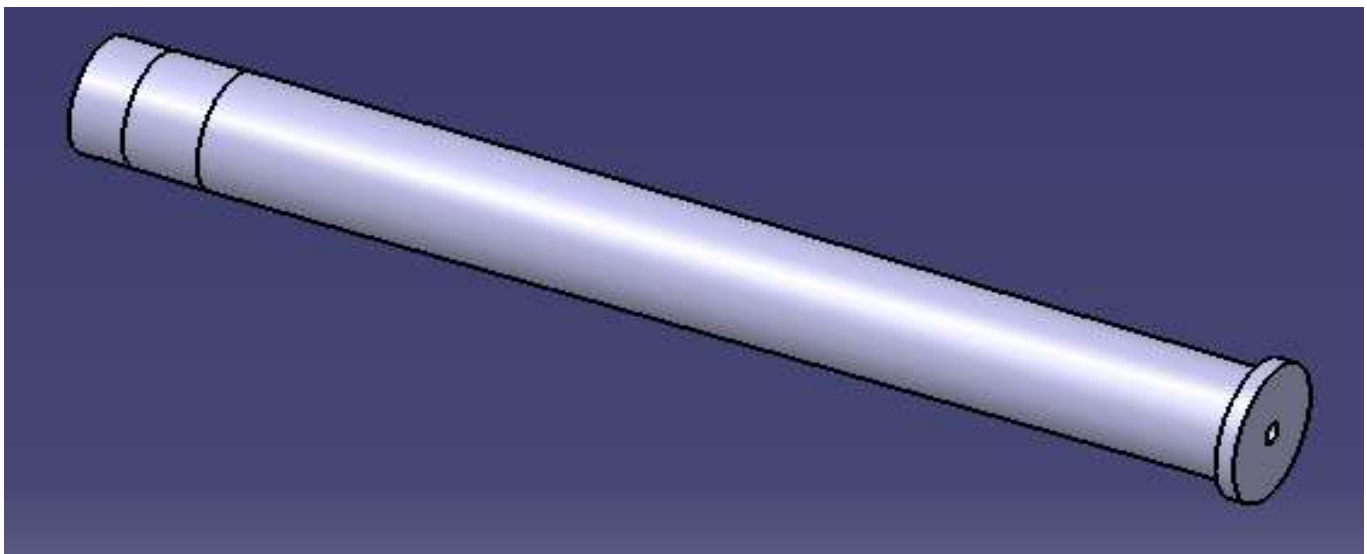
Укупна дужина чауре је:

$$l_c = l_{ok} + l_{pk} + l_g + \delta_1 \quad (4.22)$$

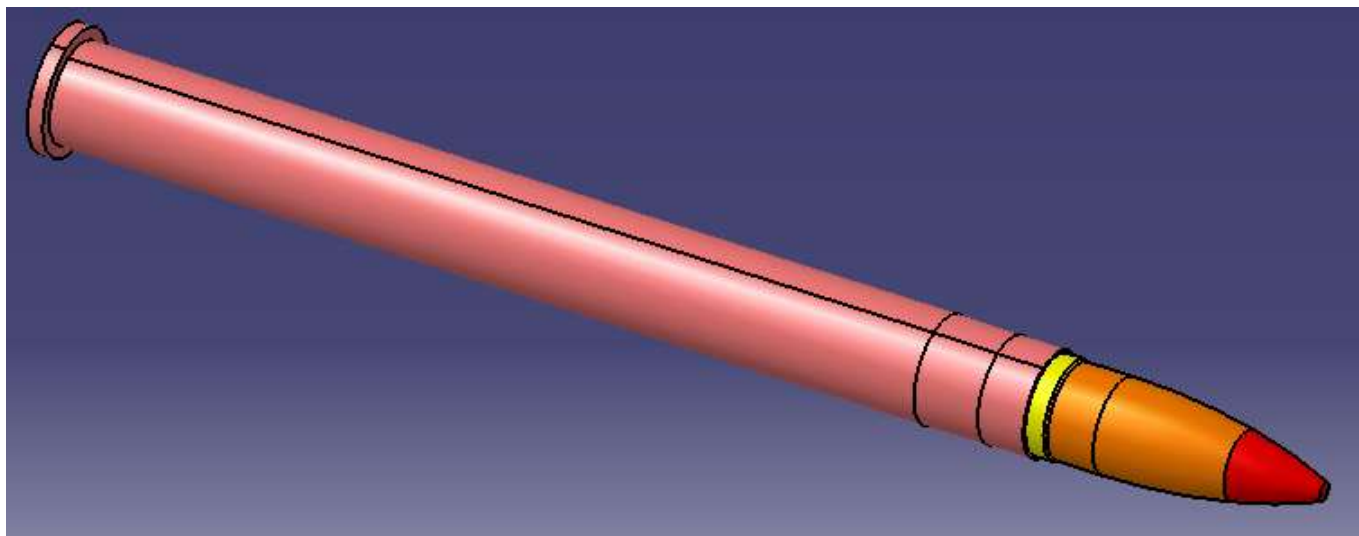
Њена вредност је:

$$l_c = 0,382 \text{ m};$$

3D модел чауре је приказан на слици 4.14.



Слика 4.14. Чаура за нови метак



Слика 4.15. Комплетни метак

Упоредом анализом пројектованог пројектила и постојећег пројектила 30 mm M68, долази се до закључка да је пројектовани пројектил бољих аеродинамичких карактеристика од 30mm M68, јер има нижу вредност аеродинамичког коефицијента C_{x0} , што доводи до већег домета пројектила. Аеродинамички коефицијенти за пројектил 30mm M68 дати су у електронском прилогу. За разлику од пројектила пројектована чаура има исту запремину и карактеристике као постојеће решење чауре.

5. СПОЉНО БАЛИСТИЧКИ ПРОРАЧУН

Кретање пројектила у ваздушном простору се одвија под утицајем силе земљине теже и силе отпора ваздуха. Ојлер је дефинисао класични балистички модел путање који се састоји од следећих претпоставки [21,22]:

- Пројектил се посматра као материјална тачка;
- Координатни систем је везан за земљу која је равна и непокретна;
- На пројектил делују сила земљине теже G и сила отпора ваздуха D ;
- Пројектил напушта цев почетном брзином V_0 , под полазним углом θ_0 , а координатни почетак је на устима цеви;
- Атмосфера је статички и термодинамички стабилна.

Ојлеров модел се не мора користити само за класичне пројектиле, већ се може проширити и на ракетне и активно-реактивне пројектиле додавањем следећих претпоставки [21,22]:

- Додавањем реактивне силе у правцу тангенте на путању;
- Узимање у обзир ротацију Земље, ветра и тренутних временских услова;
- Посматрање кретања око тежишта.

Недостаци Ојлеровог модела су [21,22]:

- Не садржи компоненту отпора ваздуха нормалну на брзину ван равни XOY ;
- Отпор D у реалним условима зависи не само од положаја тачке већ и од низа фактора међу којима је најбитнији нападни угао између осе пројектила и брзине;
- Сила G је централна сила.

Ојлер је поставио диференцијалне једначине кретања за осе Декартовог координатног система. Векторска једначина кретања пројектила је:

$$m\vec{a} = \sum \vec{F} \quad (5.1)$$

где су:

$\vec{a}$ – убрзање пројектила;

$\sum \vec{F}$ – сума свих сила које делују на пројектил.

Једначина за Ојлеров модел је [21,22]:

$$m\vec{a} = \vec{D} + \vec{G} \quad (5.2)$$

где су:

$\vec{D}$ – сила отпора ваздуха;

$\vec{G}$ – сила земљине теже пројектила.

Једначина може имати и други облик [21,22]:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{J} + \vec{g} \quad (5.3)$$

где су:

$\vec{J}$ – успорење силе отпора ваздуха;

$\vec{g}$ – убрзање земљине теже.

После дељења са скаларом m се добија једначина за убрзање:

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{J} + \vec{g} \quad (5.4)$$

где је успорење настало услед дејства силе отпора ваздуха:

$$j = \frac{\rho_v^2}{2m} SC_x \quad (5.5)$$

где су:

ρ_v^2 – густина непо ремећене струје ваздуха;

S – површина попречног пресека пројектила;

C_x – аеродинамички коефицијент аксијалне силе.

Пројекције векторске једначине убрзања и на тангенту и на нормалу путање су:

$$a_t = \frac{dv}{dt} = -J - g \sin \theta_1 \quad (5.6)$$

где је:

θ_1 – угао нагиба;

$$a_n = v \frac{d\theta}{dt} = -g \cos \theta_1 \quad (5.7)$$

Пројекције брзине на осе Декартовог координатног система су:

$$v_x = \frac{dx}{dt} = v \cos \theta_1 \quad (5.8)$$

$$v_y = \frac{dy}{dt} = v \sin \theta_1 \quad (5.9)$$

Почетни услови који се постављају су:

$$t_0 = 0;$$

$$x_0 = y_0 = 0;$$

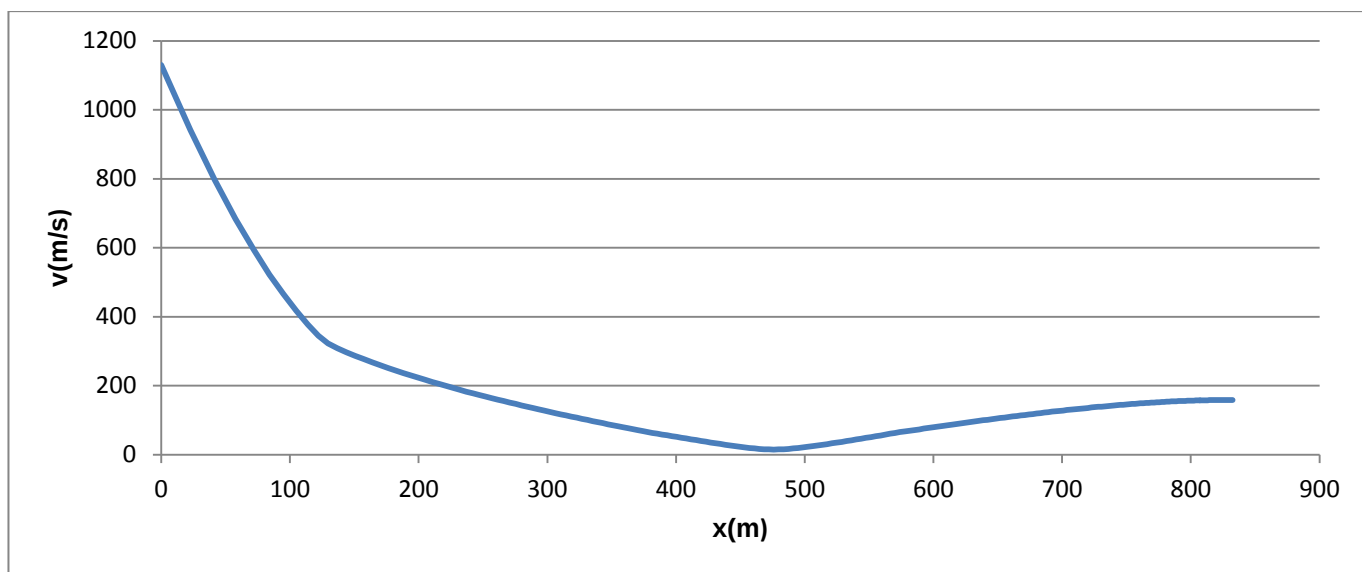
$$v(t_0) = v_0;$$

$$\theta_1(t_0) = \theta_0.$$

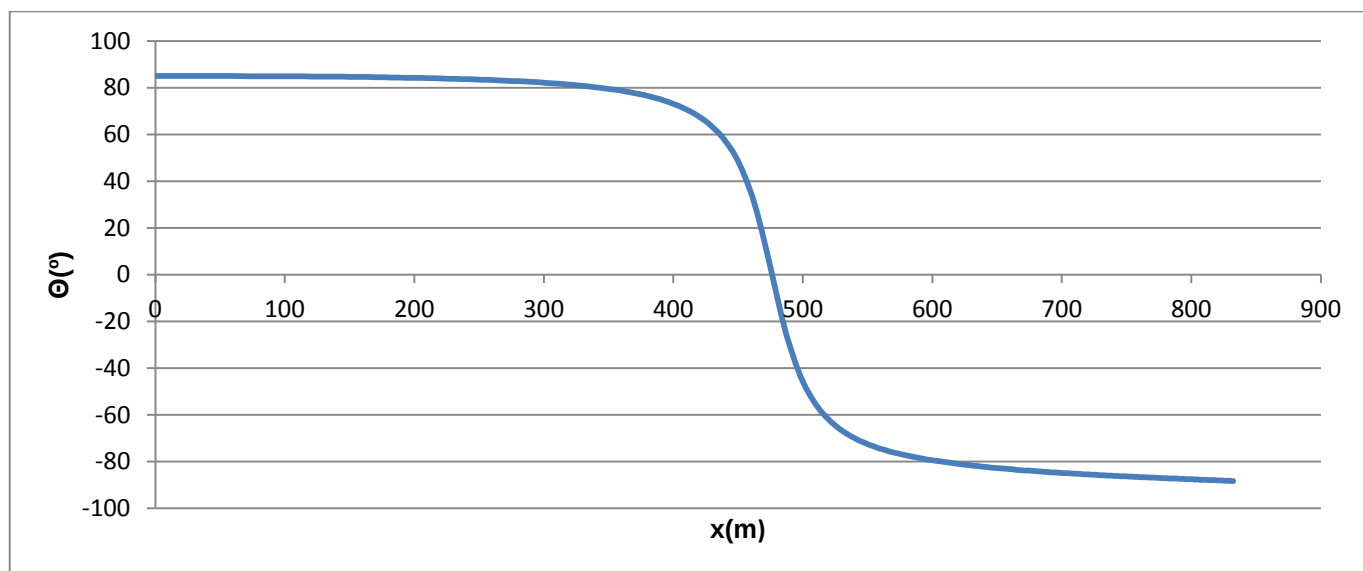
Прорачун путање пројектила се врши у програмском језику FORTRAN, односно у програмском решењу SB2.FOR. Програмско решење се састоји од:

- SB2.FOR – код написан у програмском језику FORTRAN, на основу којег се врши прорачун;
- SB2U.DAT – улазне датотеке у коју се уписују подаци као што су маса пројектила, калибар, почетна брзина, угао гађања и корак интеграције;
- SB2K.DAT – улазна датотека која садржи податке за вредност Маховог броја и аксијалног аеродинамичког коефицијента C_x , а који су добијени помоћу програмског решења ADK0.FOR.

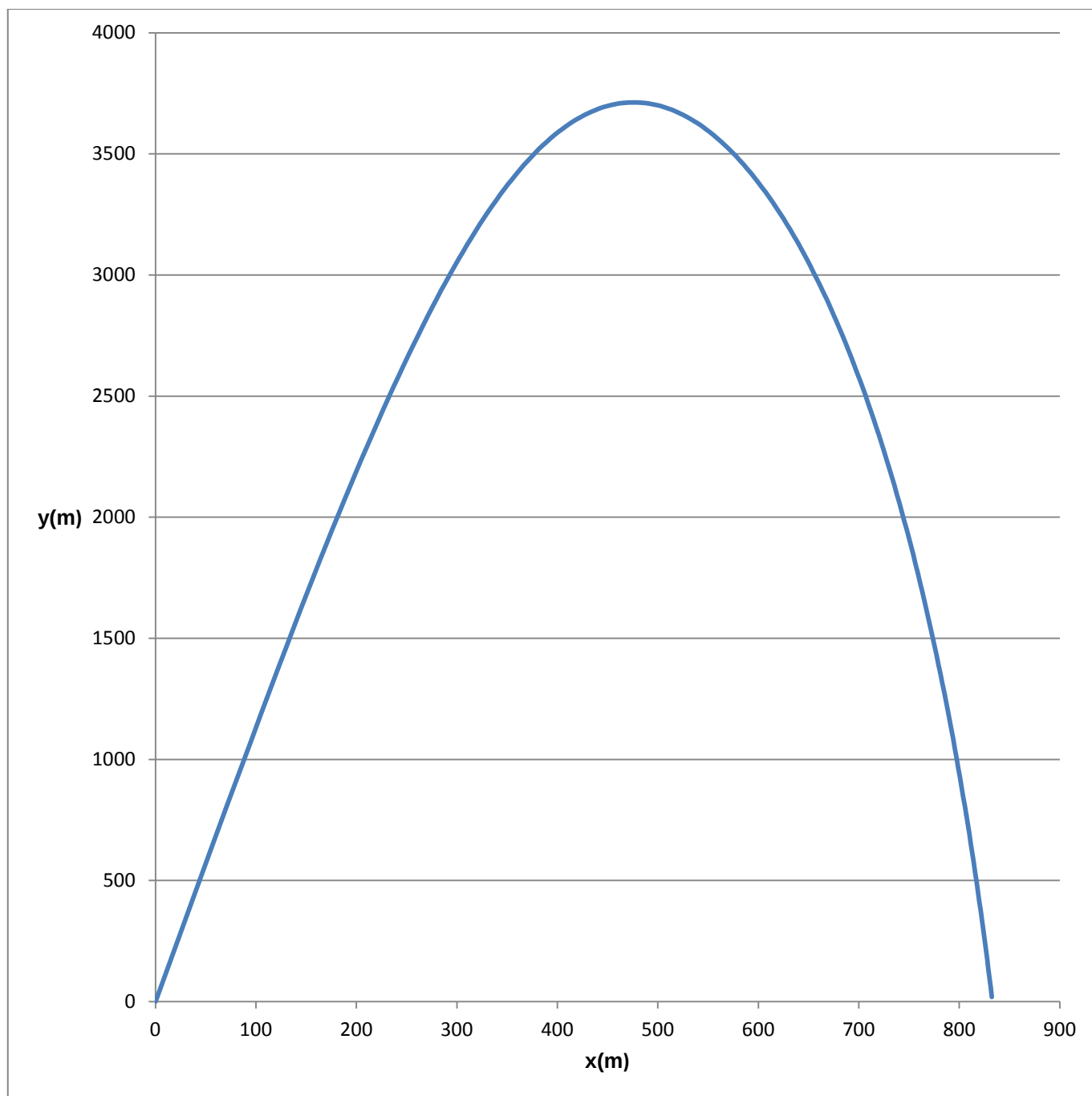
Графици добијени на основу излазних резултата су дати у наставку, а за полазни угао је узета вредност 85° , јер је средство намењено за уништавање циљева у ваздуху. Резултати који су добијени приказују да средство испуњава захтеве који су пред њега постављени, као и статичку и динамичку стабилност у току лета.



Слика 5.1. Промена брзине на путањи у ваздушном простору



Слика 5.2. Промена угла на путањи у ваздушном простору



Слика 5.3. Путања пројектила у ваздушном простору

6. ЗАКЉУЧАК

Мастер рад презентује решење једног унутрашње балистичког задатка при пројектовању оруђа калибра 30mm.

Циљ мастер рада је дефинисан у наслову, а огледа се у оптимизацији УБ параметара у фази пројектовања наоружања и то у избору: модела и типа барута, масе барута, дужине канала цеви и запремини барутне коморе. УБ параметри су израчунати методама Дроздова и Рунге-Кута, на основу којих су изабрани параметри за оптимизацију, а то су тип барута, коволумен барутних гасова, специфични рад барутних гасова, јединична брзина сагоревања барута као и маса барута. Затим се врши пројектовање унутрашње трасе цеви са свим детаљима као што су олучење, прелазни конус, лежиште метка. После пројектовања унутрашње трасе следи пројектовање спољне трасе цеви, идејно решење метка и спољно балистички прорачун за одређивање максималног домета.

Резултати добијени УБ прорачуном, првенствено максимални притисак барутних гасова у цеви у свим временским интервалима кретања пројектила кроз цев до тренутка напуштања уста цеви су улазне величине при конструисању цеви. Након УБ прорачуна, а уз помоћ једне од метода отпорности цеви, врши се пројектовање спољне трасе цеви. Након тога пројектује се унутрашња траса цеви. На основу конструисане цеви и метка извршен је спољно балистички прорачун на основу Ојлерове методе за одређивање максималног домета. Максимални домет износи 3712 метара што омогућава уништење циљева који лете до те висине.

У овом раду нисам исцрпео све могућности за повећање почетне брзине пројектила на устима цеви, односно максималног домета пројектила. Добијене резултате је пожељно испитати у пракси ради стицања увида о реалним параметрима и стварној ефикасности средства.

Даље унапређење оруђа састојало би се у сагледавању могућности о уградњи на самоходну борбену платформу, што би за последицу имало смањење броја послужиоца оруђа и већу ефикасност дејства. Са аспекта спољне балистике постоји простор за рад на побољшању конструкције пројектила ради боље аеродинамике, у циљу смањења отпора ваздуха при кретању што у крајњем случају утиче на домет.

7. ЛИТЕРАТУРА

- [1] Љ. Танчић: Практикум из унутрашње балистике, Војна академија, Београд 2012.
- [2] Љ. Танчић: Унутрашње балистичко пројектовање, Министарство одбране, Универзитет одбране, Војна академија, Београд 2014.
- [3] М. Угричић: Конструкција пројектила и упаљача, Министарство одбране, Универзитет одбране, Војна академија, Београд 2014.
- [4] З. Ристић: Механика наоружања - артиљеријских оруђа, Министарство одбране, Универзитет одбране, Војна академија, Београд 2014.
- [5] М.В.Калезић Пројектовање артиљеријских система, Ваљево Принт, Београд, 2010.
- [6] С. Јовановић: Компаративна анализа савремених авионских топова и ракета ваздух – ваздух, Универзитет у Крагујевцу, Факултет инжењерских наука, Крагујевац 2015.
- [7] М. Цветковић, Унутрашња балистика, Министарство одбране, Војна академија, Београд 1998.
- [8] <http://oklop2.tripod.com/praga/m53.htm> (20.11.2015)
- [9] http://russianammo.org/Russian_Ammunition_Page_30mm.html (21.11.2015)
- [10] <http://otpisani.niceboard.com/t758-protivavionski-top-20-3-mm-m55> (21.11.2015)
- [11] http://rightardia.blogspot.rs/2009/06/get-30-days-of-free-traffic-analysis_29.html (22.11.2015)
- [12] <http://www.srpskioklop.paluba.info/zsu57/opis.html> (23.11.2015.)
- [13] <http://fas.org/man/dod-101/sys/ac/equip/gau-8.htm> (23.11.2015.)
- [14] http://www.military.cz/usa/air/in_service/weapons/cannons/gau8/gau8_en.htm (24.11.2015)
- [15] <http://www.paluba.info/smf/index.php?topic=4536.0;wap2> (25.11.2015.)
- [16] <http://www.globalsecurity.org/military/world/europe/rh202.htm> (25.11.2015)
- [17] http://www.military-today.com/artillery/zsu_23_4_shilka.htm (26.11.2015)
- [18] <http://www.paluba.info/smf/index.php?action=printpage;topic=20149.0> (23.11.2015)
- [19] С. Ноири: Оптимизација унутрашње балистичких параметара у фази пројектовања наоружања, Министарство одбране, Универзитет одбране, Војна академија, Београд 2015.
- [20] ***: Барути југословенске производње, Војнотехнички институт, Београд 1991.
- [21] Д. Регодић: Збирка задатака из спољне балистике, Војна академија, Београд 2003.
- [22] Д. Регодић: Спољна балистика, Војна академија, Београд 1991.

ПРИЛОЗИ

ПРИЛОГ 1

УБ ПРОРАЧУН ПО МЕТОДИ РУНГЕ-КУТА

На основу постојећег програмског решења „JKMKUT.FOR“ у литератури [1] извршена је модификација улазне датотеке за конкретни калибар.

1.1 Улазна датотека „UJK30.DAT“

READ команда у програмском језику „FORTRAN“ служи за читавање улазних података из датотеке у којој се налазе.

```
READ(60,*) W0,SC,XU,EM,AMB,TETA,ROB,ALFA  
READ(60,*) R0,DM,DV,C,FI  
READ(60,*) FB,P0,UZ0,V0,X0,T0  
READ(60,*) OR, BARUT
```

W0 – запремина барутне коморе; SC – попречни пресек цеви; XU – Укупни пут пројектила у цеви; EM – маса пројектила; AMB – маса барута; TETA – однос специфичних топлота умањен за 1; ROB – запреминска маса барута; ALFA – коволумен барутних гасова; R0 – половина дебљине барутног зрна; DM – мали пречник; DV – велики пречник

O ; C – дужина барутног зрна; FI – коефицијент фиктивности; FB – специфичан рад барутних гасова; P0 – притисак форсирања; UZ0 – јединична брзина сагоревања барута; V0 – дозвољена грешка рачунања брзине; X0 – дозвољена грешка рачунања пута; T0 – дозвољена грешка рачунања времена; OR – назив оруђа ; BARUT – ознака барута;

```
0.000245,0.000729,2.00,0.36,0.195,0.265,1580,0.000966  
0.00048,0.000044,0.00017,0.0021,1.19  
972525,30E+06,9.1E-10,0,0,0  
'TOP 30 MM','NC-53'
```

1.2 Излазна датотека „IJK30.DAT“

Подаци добијени у излазној датотеци су:

PSI – релативна сагорела дебљина барута; V – брзина пројектила; X – пређени пут пројектила у цеви; P – притисак пројектила у цеви; T – време;

UB-PRORACUN PO METODI RUNGE-KUTA
S KONSTANTNIM KORAKOM
ORUDJE TOP 30 MM
BARUT NC-53

JEDINICE PO SI SISTEMU MERA

POLAZNI PODACI

W0 =	0,0003	SC =	0,0007	XU =	2	FI =	1,19	M =	0,36
MB =	0,195	FB =	972525	ROB =	1580	ALFA	0,001	TETA =	0.26500
R0 =	0.00048	DM =	0.00004	DV =	0.00017	C =	0.00210	KAPA =	0.85954
LAMDA =	0.37398	MI =	-26880	UZ0 =	0.91E-09	P0 =	0.30E+08		

PRETHODNI PERIOD

Y0=0.01952 PSI0=0.01904 SIG0=1.00100

PRVI PERIOD

PRVA FAZA

I	PSI	V	X	P	T
1	0.060348	44.00	0.008	91569696.	0.0005
2	0.105118	88.01	0.022	148719024.	0.0007
3	0.151041	132.01	0.039	197531008.	0.0009
4	0.197955	176.01	0.057	238198576.	0.0010
5	0.245695	220.02	0.077	271115232.	0.0011
6	0.294099	264.02	0.099	296763712.	0.0012
7	0.343003	308.03	0.123	315675456.	0.0013
8	0.392243	352.03	0.149	328410944.	0.0013
9	0.441657	396.03	0.179	335546912.	0.0014
10	0.491081	440.04	0.211	337667104.	0.0015
11	0.540352	484.04	0.246	335353888.	0.0016
12	0.589307	528.04	0.285	329181216.	0.0016
13	0.637781	572.05	0.329	319707808.	0.0017
14	0.685613	616.05	0.378	307471360.	0.0018
15	0.732637	660.05	0.433	292983328.	0.0019
16	0.778692	704.06	0.495	276724992.	0.0020
17	0.823614	748.06	0.565	259143728.	0.0021
18	0.867239	792.07	0.645	240651008.	0.0022
19	0.909404	836.07	0.736	221620544.	0.0023
20	0.949946	880.07	0.841	202387680.	0.0024

**DRUGA FAZA

21	0.959457	902.51	0.901	189544928.	0.0025
22	0.967966	924.95	0.967	176834848.	0.0026
23	0.975474	947.39	1.039	164317392.	0.0026
24	0.981981	969.83	1.119	152048080.	0.0027

25	0.987487	992.27	1.208	140077792.	0.0028
26	0.991991	1014.71	1.306	128452976.	0.0029
27	0.995495	1037.15	1.417	117215656.	0.0030
28	0.997998	1059.59	1.540	106403416.	0.0031
29	0.999499	1082.03	1.680	96049568.	0.0033
30	1.000000	1104.47	1.839	86183136.	0.0034

DRUGI PERIOD

I	X	V	P	T
31	1.855	1106.60	85274008.	0.0034
32	1.871	1108.70	84381912.	0.0034
33	1.887	1110.78	83506392.	0.0035
34	1.903	1112.83	82647000.	0.0035
35	1.919	1114.86	81803312.	0.0035
36	1.935	1116.86	80974928.	0.0035
37	1.952	1118.84	80161440.	0.0035
38	1.968	1120.79	79362480.	0.0035
39	1.984	1122.73	78577656.	0.0035
40	2.000	1124.64	77806624.	0.0036

ПРИЛОГ 2

ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ЦЕВИ

На основу постојећег програмског решења „KODCEV.FOR“ за димензионисање цеви у литератури [19] извршена је модификација улазне датотеке за конкретни калибар.

2.1. Улазна датотека „UBPX30.DAT“

READ команда у програмском језику „FORTRAN“ служи за учитавање улазних података из датотеке у којој се налазе.

READ (2,*)Y(L),X(L),P(L)

Y(L) – релативна сагорела маса барута у односу на L; X(L) – пут пројектила у цеви у односу на L; P(L) – притисак барутних гасова у односу на L, а L је број сегмената.

0,01952	0	30000000
0,06035	0,008	91569696
0,10512	0,022	148719024
0,15104	0,039	197531008
0,19796	0,057	238198576
0,2457	0,077	271115232
0,2941	0,099	296763712
0,343	0,123	315675456
0,39224	0,149	328410944
0,44166	0,179	335546912
0,49108	0,211	337667104
0,54035	0,246	335353888
0,58931	0,285	329181216
0,63778	0,329	319707808
0,68561	0,378	307471360
0,73264	0,433	292983328
0,77869	0,495	276724992
0,82361	0,565	259143728
0,86724	0,645	240651008
0,9094	0,736	221620544
0,94995	0,841	202387680
0,95946	0,901	189544928
0,96797	0,967	176834848
0,97547	1,039	164317392

0,98198	1,119	152048080
0,98749	1,208	140077792
0,99199	1,306	128452976
0,9955	1,417	117215656
0,998	1,54	106403416
0,9995	1,68	96049568
1	1,839	86183136
1	1,86	84995720
1	1,881	83837288
1	1,902	82706824
1	1,923	81603360
1	1,944	80525984
1	1,965	79473816
1	1,987	78446016
1	2,008	77441768
1	2,029	76460320
1	2,05	75500912

2.2. Улазна датотека „ULUB30.DAT“

READ команда у програмском језику „FORTRAN“ служи за учитавање улазних података из датотеке у којој се налазе.

```
READ (1,*)W0,SK,S,DK,D,OM,EM,SIGE,AUT,METO
```

W0 – запремина барутне коморе; SK – попречни пресек барутне коморе; S – попречни пресек цеви; DK – највећи пречник лежишта метка; D – калибар; OM – маса барута; EM – маса пројектила;

```
0.000245,0.00080,0.000729,0.032,0.030,0.16,0.360,120E+07,1,0
```

2.3. Излазна датотека „IDACE.DAT“

Подаци добијени у излазној датотеци су:

X(M) – дужина у цеви у односу на M; PRI(M) – конструкциони притисак у односу на M; R2 – спољни полупречник цеви у односу на M; R1 – унутрашњи пречник цеви у односу на M, а M је број сегмената цеви.

```
PRAKTICNO DIMENZIONISANA CEV
XM=0.211000  XK=1.839000  XU=2.050000
PM= 337667104.  PK= 86183136.  PU= 75500912.
LU=2.356250
```

M	X(M)	PRI(M)	R2	R1
1	0.00000	545733696.	0.07524	0.01600
2	0.02586	541239552.	0.07230	0.01600
3	0.05173	536745376.	0.06969	0.01600
4	0.07759	532251232.	0.06734	0.01600
5	0.10345	527757088.	0.06521	0.01600
6	0.12931	523262912.	0.06327	0.01600
7	0.15518	518768768.	0.06150	0.01600
8	0.18104	514274624.	0.05986	0.01600
9	0.20690	509780448.	0.05835	0.01600
10	0.23276	505286304.	0.05695	0.01600
11	0.25863	500792160.	0.05565	0.01600
12	0.28449	496297984.	0.05443	0.01600
13	0.31035	491803840.	0.04995	0.01500
14	0.33621	487309696.	0.04895	0.01500
15	0.36208	482815520.	0.04800	0.01500
16	0.38794	478321376.	0.04711	0.01500
17	0.41380	473827232.	0.04626	0.01500
18	0.43966	469333056.	0.04546	0.01500
19	0.46553	464838912.	0.04469	0.01500
20	0.49139	460344768.	0.04397	0.01500
21	0.51725	455850592.	0.04328	0.01500
22	0.55225	445985152.	0.04187	0.01500
23	0.59125	442662848.	0.04143	0.01500
24	0.63525	435278112.	0.04049	0.01500
25	0.68425	424353152.	0.03921	0.01500
26	0.73925	410491328.	0.03775	0.01500
27	0.80125	394242848.	0.03622	0.01500
28	0.87125	376100160.	0.03473	0.01500
29	0.95125	356589440.	0.03331	0.01500
30	1.04225	336067264.	0.03198	0.01500
31	1.14725	314991296.	0.03078	0.01500
32	1.20725	299332064.	0.02997	0.01500
33	1.27325	283702624.	0.02922	0.01500
34	1.34525	268123728.	0.02852	0.01500
35	1.42525	252733424.	0.02788	0.01500
36	1.51425	237581920.	0.02729	0.01500
37	1.61225	222657072.	0.02675	0.01500
38	1.72325	208131088.	0.02625	0.01500
39	1.84625	193914304.	0.02579	0.01500
40	1.98625	180163456.	0.02536	0.01500
41	2.14525	166872624.	0.02497	0.01500
42	2.16625	165252896.	0.02492	0.01500

43	2.18725	163670768.	0.02488	0.01500
44	2.20825	162124944.	0.02483	0.01500
45	2.22925	160614176.	0.02479	0.01500
46	2.25025	159137344.	0.02475	0.01500
47	2.27125	157693296.	0.02471	0.01500
48	2.29325	156310832.	0.02467	0.01500
49	2.31425	154928816.	0.02463	0.01500
50	2.33525	153576528.	0.02459	0.01500
51	2.35625	152252992.	0.02456	0.01500

ПРИЛОГ 3

ОДРЕЂИВАЊЕ МАСЕ ПРОЈЕКТИЛА

На основу постојећег програмског решења „MASA.FOR“ за одређивање масе пројектила у литератури [19] извршена је модификација улазне датотеке за конкретни пројектил.

3.1. Улазна датотека „UMASA.DAT“

READ команда у програмском језику „FORTRAN“ служи за учитавање улазних података из датотеке у којој се налазе.

READ(1,*)RV(I),RU(I),HI(I)

RV(I) – спољни пречник кошуљице; RU(I) – унутрашњи пречник кошуљице; HI(I) – растојање између поља, а I број сегмената.

20

0,0134	0	0,003
0,0136	0,01	0,004
0,0141	0,011	0,004
0,0146	0,011	0,004
0,015	0,011	0,006
0,0144	0,0095	0,007
0,015	0,0095	0,0029
0,0147	0,0095	0,0029
0,0144	0,0095	0,0029
0,0141	0,0095	0,0029
0,0138	0,0071	0,0029
0,0135	0,0071	0,0029
0,0133	0,0065	0,0029
0,013	0,005	0,0029
0,0127	0,005	0,0029
0,0124	0,005	0,0029
0,0121	0,005	0,0029
0,0118	0,005	0,0029
0,0115	0,005	0,0029
0,0112	0,005	0,0029

3.2. Излазна датотека „IMASA.DAT“

Подаци добијени у излазној датотеци су:

RV – спољашњи пречник кошуљице; RU – унутрашњи пречник кошуљице; V – запремина сегмента;
МК – маса кошуљице; МЕ- маса експлозивног пуњења;

RV	RU	V	МК	МЕ
0.013400	0.000000	0.0000017	0.01286	0.000000
0.013600	0.010000	0.0000011	0.00811	0.001910
0.014100	0.011000	0.0000010	0.00743	0.002311
0.014600	0.011000	0.0000012	0.00880	0.002311
0.015000	0.011000	0.0000020	0.01490	0.003467
0.014400	0.009500	0.0000026	0.01957	0.003017
0.015000	0.009500	0.0000012	0.00933	0.001250
0.014700	0.009500	0.0000011	0.00871	0.001250
0.014400	0.009500	0.0000011	0.00811	0.001250
0.014100	0.009500	0.0000010	0.00752	0.001250
0.013800	0.007100	0.0000013	0.00970	0.000698
0.013500	0.007100	0.0000012	0.00913	0.000698
0.013300	0.006500	0.0000012	0.00932	0.000585
0.013000	0.005000	0.0000013	0.00997	0.000346
0.012700	0.005000	0.0000012	0.00944	0.000346
0.012400	0.005000	0.0000012	0.00892	0.000346
0.012100	0.005000	0.0000011	0.00841	0.000346
0.011800	0.005000	0.0000010	0.00791	0.000346
0.011500	0.005000	0.0000010	0.00743	0.000346
0.011200	0.005000	0.0000009	0.00695	0.000346

UKUPNA MASA KOSULJICE= 0.1925161 kg
UKUPNA MASA EXPLOZIVNOG PUNJENJA= 0.0224199 kg
UKUPNA MASA PROJEKTILA= 1.2992436 kg

ПРИЛОГ 4

СПОЉНО БАЛИСТИЧКИ ПРОРАЧУН

На основу постојећег програмског решења „SB2.FOR“ за спољно балистички прорачун у литератури [22] извршена је модификација улазне датотеке за конкретни пројектил.

4.1. Улазна датотека „SB2U.DAT“

READ команда у програмском језику „FORTRAN“ служи за учитавање улазних података из датотеке у којој се налазе.

```
READ(1,*)MASA,D  
READ(1,*)X0,Y0,V0,THETAS0,T,H
```

MASA – маса пројектила; D – калибар пројектила; X0, Y0 – полазне тачке (апциса и ордината); V0 – почетна брзина; THETAS0 – почетни угао гађања; T – почетно време; H – корек интеграције

0.27 .030

0. 0. 1130.0 85 0. 0.05

4.2. Улазна датотека „SB2K.DAT“

READ команда у програмском језику „FORTRAN“ служи за учитавање улазних података из датотеке у којој се налазе.

```
READ(3,*)MAI(I),CXI(I)
```

MAI(I) – вредност Махових бројева; CXI(I) – вредност аеродинамичког коефицијента у односу на Махов број, а I је бројач Махових бројева и аеродинамичких коефицијената.

0.200	0.159
0.500	0.156
0.600	0.157
0.700	0.159
0.800	0.164
0.850	0.166
0.900	0.176
0.950	0.229
0.975	0.270
1.000	0.352
1.100	0.420
1.200	0.427
1.300	0.419
1.400	0.371

1.500	0.399
1.600	0.388
1.700	0.377
1.800	0.367
2.000	0.349
2.200	0.332
2.500	0.310
3.000	0.278
3.500	0.253
4.0	.233

4.3. Излазна датотека „SB2I.DAT“

Подаци добијени у излазној датотеци су:

T – време лета пројектила; X – домет пројектила у односу на време лета пројектила; Y – висина пројектила у односу на време лета пројектила; THETA – угао пројектила у односу на време лета пројектила.

T	X	Y	V	THETA
0	0	0	1130	85
0,25	22,524	256,84	941,31	84,988
0,5	41,485	472,48	796,71	84,974
0,75	57,697	656,29	684	84,957
1	71,752	815,07	594,54	84,938
1,25	84,085	953,83	522,37	84,915
1,5	95,036	1076,5	465,46	84,89
1,75	104,9	1186,3	417,51	84,861
2	113,82	1285	377,15	84,829
2,25	121,97	1374,8	345,39	84,794
2,5	129,57	1457,8	323,12	84,756
2,75	136,82	1536,3	308,51	84,715
3	143,82	1611,6	296,93	84,672
3,25	150,63	1684,2	286,59	84,627
3,5	157,26	1754,3	277,04	84,58
3,75	163,73	1822,2	268,03	84,531
4	170,05	1887,8	259,53	84,48
4,25	176,23	1951,4	251,48	84,426

4,5	182,28	2013	243,84	84,371
4,75	188,2	2072,7	236,57	84,313
5	194,01	2130,7	229,63	84,253
5,25	199,72	2187	222,99	84,19
5,5	205,31	2241,6	216,62	84,125
5,75	210,82	2294,7	210,5	84,058
6	216,22	2346,3	204,61	83,987
6,25	221,55	2396,5	198,94	83,913
6,5	226,78	2445,3	193,46	83,837
6,75	231,94	2492,7	188,16	83,757
7	237,02	2538,8	183,04	83,674
7,25	242,04	2583,7	178,07	83,588
7,5	246,98	2627,3	173,25	83,498
7,75	251,86	2669,7	168,57	83,404
8	256,67	2711	164,02	83,306
8,25	261,42	2751,2	159,59	83,204
8,5	266,12	2790,3	155,27	83,097
8,75	270,76	2828,3	151,07	82,986
9	275,35	2865,2	146,96	82,87
9,25	279,89	2901,2	142,94	82,748
9,5	284,38	2936,2	139,02	82,621
9,75	288,83	2970,1	135,18	82,488
10	293,23	3003,2	131,43	82,349
10,25	297,58	3035,3	127,75	82,203
10,5	301,9	3066,5	124,14	82,05
10,75	306,18	3096,8	120,61	81,89
11	310,41	3126,2	117,14	81,721
11,25	314,62	3154,7	113,73	81,544
11,5	318,78	3182,4	110,38	81,357
11,75	322,92	3209,3	107,09	81,161
12	327,02	3235,3	103,85	80,954
12,25	331,09	3260,6	100,67	80,735
12,5	335,13	3285	97,534	80,503
12,75	339,14	3308,7	94,446	80,259
13	343,12	3331,6	91,403	79,999
13,25	347,08	3353,7	88,404	79,724
13,5	351,01	3375	85,445	79,431

13,75	354,92	3395,7	82,526	79,12
14	358,81	3415,6	79,645	78,787
14,25	362,67	3434,7	76,8	78,432
14,5	366,51	3453,2	73,99	78,052
14,75	370,33	3470,9	71,214	77,645
15	374,13	3488	68,471	77,206
15,25	377,91	3504,3	65,759	76,734
15,5	381,69	3520	63,313	76,225
15,75	385,46	3535,1	60,934	75,675
16	389,23	3549,5	58,561	75,081
16,25	393	3563,4	56,195	74,437
16,5	396,77	3576,6	53,836	73,737
16,75	400,54	3589,2	51,487	72,972
17	404,31	3601,2	49,147	72,134
17,25	408,08	3612,6	46,819	71,213
17,5	411,85	3623,4	44,504	70,196
17,75	415,62	3633,5	42,205	69,068
18	419,39	3643,1	39,924	67,81
18,25	423,16	3652	37,665	66,4
18,5	426,93	3660,3	35,431	64,812
18,75	430,7	3668	33,228	63,011
19	434,47	3675,1	31,063	60,957
19,25	438,24	3681,6	28,943	58,599
19,5	442,01	3687,5	26,88	55,874
19,75	445,78	3692,7	24,888	52,704
20	449,55	3697,4	22,985	48,997
20,25	453,32	3701,4	21,196	44,642
20,5	457,09	3704,8	19,551	39,521
20,75	460,87	3707,6	18,089	33,517
21	464,64	3709,8	16,86	26,551
21,25	468,41	3711,4	15,915	18,627
21,5	472,18	3712,4	15,31	9,895
21,75	475,95	3712,7	15,083	0,677
22	479,72	3712,5	15,252	-8,576
22,25	483,49	3711,6	15,805	-17,4
22,5	487,26	3710,1	16,703	-25,46
22,75	491,03	3708	17,895	-32,57

23	494,8	3705,3	19,326	-38,71
23,25	498,57	3702	20,947	-43,95
23,5	502,34	3698	22,718	-48,41
23,75	506,11	3693,5	24,606	-52,2
24	509,88	3688,3	26,586	-55,44
24,25	513,65	3682,5	28,64	-58,23
24,5	517,42	3676,1	30,752	-60,64
24,75	521,19	3669,1	32,911	-62,73
25	524,96	3661,5	35,109	-64,56
25,25	528,73	3653,3	37,338	-66,18
25,5	532,5	3644,4	39,594	-67,62
25,75	536,27	3635	41,872	-68,89
26	540,04	3624,9	44,169	-70,04
26,25	543,81	3614,2	46,482	-71,07
26,5	547,59	3602,9	48,808	-72,01
26,75	551,36	3591	51,146	-72,86
27	555,13	3578,5	53,494	-73,63
27,25	558,9	3565,3	55,852	-74,34
27,5	562,67	3551,6	58,217	-74,99
27,75	566,44	3537,2	60,589	-75,59
28	570,21	3522,2	62,967	-76,15
28,25	573,98	3506,6	65,351	-76,66
28,5	577,74	3490,5	67,434	-77,14
28,75	581,48	3473,8	69,491	-77,59
29	585,21	3456,5	71,531	-78,01
29,25	588,92	3438,8	73,553	-78,41
29,5	592,6	3420,5	75,557	-78,78
29,75	596,27	3401,7	77,541	-79,13
30	599,92	3382,4	79,506	-79,47
30,25	603,54	3362,7	81,449	-79,78
30,5	607,15	3342,4	83,372	-80,08
30,75	610,73	3321,6	85,272	-80,36
31	614,29	3300,3	87,15	-80,63
31,25	617,83	3278,6	89,005	-80,89
31,5	621,34	3256,4	90,837	-81,13
31,75	624,83	3233,7	92,645	-81,37
32	628,3	3210,6	94,429	-81,59

32,25	631,74	3187	96,188	-81,8
32,5	635,16	3163	97,923	-82,01
32,75	638,56	3138,5	99,632	-82,2
33	641,93	3113,7	101,32	-82,39
33,25	645,27	3088,3	102,97	-82,57
33,5	648,59	3062,6	104,61	-82,74
33,75	651,89	3036,5	106,21	-82,91
34	655,15	3009,9	107,79	-83,07
34,25	658,4	2983	109,34	-83,22
34,5	661,61	2955,6	110,87	-83,37
34,75	664,8	2927,9	112,37	-83,52
35	667,96	2899,8	113,84	-83,66
35,25	671,1	2871,3	115,29	-83,79
35,5	674,2	2842,5	116,7	-83,92
35,75	677,28	2813,3	118,1	-84,05
36	680,33	2783,8	119,46	-84,17
36,25	683,36	2753,9	120,8	-84,29
36,5	686,36	2723,7	122,11	-84,4
36,75	689,33	2693,1	123,39	-84,51
37	692,27	2662,3	124,64	-84,62
37,25	695,18	2631,1	125,87	-84,72
37,5	698,06	2599,6	127,07	-84,82
37,75	700,92	2567,8	128,25	-84,92
38	703,75	2535,7	129,4	-85,02
38,25	706,55	2503,4	130,52	-85,11
38,5	709,32	2470,7	131,61	-85,2
38,75	712,06	2437,8	132,68	-85,29
39	714,77	2404,6	133,72	-85,38
39,25	717,46	2371,2	134,74	-85,46
39,5	720,11	2337,4	135,73	-85,54
39,75	722,74	2303,5	136,69	-85,62
40	725,34	2269,3	137,63	-85,7
40,25	727,91	2234,9	138,55	-85,77
40,5	730,45	2200,2	139,44	-85,85
40,75	732,97	2165,3	140,3	-85,92
41	735,45	2130,2	141,14	-85,99
41,25	737,91	2094,9	141,96	-86,06

41,5	740,34	2059,4	142,75	-86,13
41,75	742,74	2023,7	143,51	-86,19
42	745,11	1987,8	144,26	-86,26
42,25	747,46	1951,8	144,98	-86,32
42,5	749,77	1915,5	145,68	-86,38
42,75	752,06	1879,1	146,35	-86,44
43	754,32	1842,5	147,01	-86,5
43,25	756,55	1805,7	147,64	-86,56
43,5	758,76	1768,8	148,25	-86,62
43,75	760,94	1731,7	148,83	-86,67
44	763,09	1694,5	149,4	-86,73
44,25	765,21	1657,1	149,94	-86,78
44,5	767,31	1619,7	150,47	-86,83
44,75	769,38	1582	150,97	-86,88
45	771,43	1544,3	151,46	-86,93
45,25	773,44	1506,4	151,92	-86,98
45,5	775,43	1468,4	152,37	-87,03
45,75	777,4	1430,3	152,8	-87,08
46,001	779,34	1392,1	153,21	-87,12
46,251	781,25	1353,8	153,6	-87,17
46,501	783,14	1315,4	153,97	-87,22
46,751	785	1276,9	154,32	-87,26
47,001	786,84	1238,4	154,66	-87,3
47,251	788,65	1199,7	154,98	-87,34
47,501	790,44	1160,9	155,29	-87,39
47,751	792,2	1122,1	155,57	-87,43
48,001	793,94	1083,2	155,85	-87,47
48,251	795,65	1044,3	156,1	-87,51
48,501	797,34	1005,3	156,34	-87,55
48,751	799,01	966,19	156,57	-87,58
49,001	800,65	927,05	156,78	-87,62
49,251	802,27	887,87	156,98	-87,66
49,501	803,86	848,63	157,16	-87,7
49,751	805,44	809,35	157,33	-87,73
50,001	806,99	770,03	157,48	-87,77
50,251	808,52	730,67	157,63	-87,8
50,501	810,02	691,28	157,76	-87,84

50,751	811,51	651,85	157,87	-87,87
51,001	812,97	612,4	157,98	-87,9
51,251	814,41	572,92	158,07	-87,93
51,501	815,83	533,42	158,15	-87,97
51,751	817,22	493,9	158,22	-88
52,001	818,6	454,36	158,28	-88,03
52,251	819,96	414,8	158,33	-88,06
52,501	821,29	375,24	158,36	-88,09
52,751	822,61	335,67	158,39	-88,12
53,001	823,9	296,09	158,41	-88,15
53,251	825,18	256,51	158,42	-88,18
53,501	826,43	216,92	158,41	-88,2
53,751	827,67	177,34	158,4	-88,23
54,001	828,89	137,76	158,38	-88,26
54,251	830,09	98,187	158,35	-88,29
54,501	831,27	58,621	158,32	-88,31
54,751	832,43	19,065	158,27	-88,34

На основу постојећег програмског решења „ADK0.FOR“ за осносиметрично опструјавање пројектила у литератури [22] извршена је модификација улазне датотеке за конкретни пројектил.

4.4. Улазна датотека ADK0U.DAT

READ команда у програмском језику „FORTRAN“ служи за учитавање улазних података из датотеке у којој се налазе.

READ(1,*)DREF,LT,LN,RTR,LBT,DB,DM,DBND,XCGN

DREF – калибар пројектила; LT – дужина пројектила у калибрима; LN – дужина предњег дела пројектила у калибрима; RTR – однос полупречника оживала; LBT – дужина задњег конуса; DB – пречник дна пројектила у калибрима; DM – пречник врха пројектила у калибрима; DBND – пречник водећег прстена;

1

30 .694 2.261 1.0 0.500 0.877 0.200 1.040 2.230

2

4.5. Излазна датотека ADK0I.DAT

Подаци добијени у излазној датотеци су:

M – вредност Маховог броја; CD0 – аеродинамички коефицијент пројектила; CDH – аеродинамички коефицијент предњег дела пројектила; CDSF – аеродинамички коефицијент силе трења; CDBND –

аеродинамички коефицијент водећег прстена; CDBT – аеродинамички коефицијент задњег конуса;
CDB – аеродинамички коефицијент дна пројектила

REF. TOTAL NOSE RT/R BOATTAIL BASE MEPLAT BAND XCG. BOUND

DIA.	LENGTH	LENGTH	LENGTH	DIA.	DIA.	DIA.	NOSE	LAYER
(MM)	(CAL)	(CAL)	(CAL)	(CAL)	(CAL)	(CAL)	(CAL)	CODE
30.0	3.694	2.261	1.00	0.500	0.877	0.200	1.040	2.23 2
M	CD0	CDH	CDSF	CDBND	CDBT	CDB	PB/P1	
0,2	0,159	0	0,06	0	0	0,098	0,996	
0,5	0,156	0	0,05	0	0	0,106	0,976	
0,6	0,157	0	0,048	0	0	0,109	0,964	
0,7	0,159	0	0,046	0	0	0,113	0,95	
0,8	0,164	0	0,045	0,002	0	0,116	0,932	
0,85	0,166	0	0,044	0,004	0	0,118	0,922	
0,9	0,176	0,001	0,044	0,008	0,003	0,12	0,912	
0,95	0,229	0,036	0,043	0,016	0,012	0,122	0,9	
0,975	0,27	0,052	0,043	0,02	0,034	0,122	0,894	
1	0,352	0,067	0,042	0,02	0,068	0,155	0,859	
1,1	0,42	0,166	0,041	0,018	0,042	0,153	0,832	
1,2	0,427	0,167	0,04	0,016	0,054	0,15	0,803	
1,3	0,419	0,165	0,039	0,015	0,053	0,147	0,774	
1,4	0,371	0,126	0,038	0,014	0,049	0,144	0,743	
1,5	0,399	0,163	0,037	0,013	0,045	0,14	0,713	
1,6	0,388	0,16	0,036	0,013	0,042	0,137	0,682	
1,7	0,377	0,158	0,035	0,012	0,039	0,133	0,651	
1,8	0,367	0,156	0,034	0,012	0,037	0,129	0,621	
2	0,349	0,153	0,033	0,011	0,032	0,12	0,563	
2,2	0,332	0,15	0,031	0,011	0,029	0,112	0,509	
2,5	0,31	0,146	0,029	0,01	0,025	0,099	0,437	
3	0,278	0,142	0,027	0,01	0,02	0,08	0,343	
3,5	0,253	0,138	0,024	0,009	0,016	0,065	0,275	
4	0,233	0,135	0,022	0,009	0,014	0,053	0,227	