

**Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу
Војна академија Универзитета одбране у Београду**



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Предмет: Унутрашњебалистичко пројектовање

Број индекса: 331/2019

Бобан Д. Јањић

**Унутрашњебалистичко пројектовање цеви
хаубице 122 mm**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. пп доцент др Небојша Христов
2. _____
3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

ПРИЛОГ 6: Пријава мастер рада



**Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука**



Основне студије: **Војноиндустријско инжењерство**

Студијско подручје (усмерење): **Општи смер**

Име и презиме: **Бобан Јањић**

Број индекса: 331/2019

ПРИЈАВА МАСТЕР РАДА

Тема рада: **УНУТРАШЊЕБАЛИСТИЧКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ
ЦЕВИ ХАУБИЦЕ 122mm**

Задатак: Примарни задатак мастер рада је дефинисање процедура пројектовања цеви хаубице 122mm. Кроз мастер рад треба да се презентују табличне методе пројектовања и упоређивање са нумеричким прорачуном балистичких параметара и елемената цеви. Кандидат треба да изврши оптимизацију полазних параметара првенствено кроз варирање балистичких карактеристика погонског пуњења. Одговарајућим алгоритмом ће бити креиран систем за нумерички прорачун конструктивних параметара елемената цеви са одговарајућим сигурносним коефицијентима. На основу конструктивних параметара је неопходно да се изради 3D модел цеви одговарајућим CAD алатом. Кандидат треба да на основу елемената пројектила изврши спољнобалистички прорачун елемената лета пројектила са основним и оптимизованим елементима УБ параметара и да одговарајућа поређења са каталожним вредностима таблица гађања. Овим радом кандидат треба првенствено да презентује методолошки приступ код пројектовања цеви за било који систем класичног наоружања.

Ментор:

др Небојша Христов, доцент

Крагујевац, 09.09.2020. године

РЕЗИМЕ

У мастер раду су представљене етапе пројектовања цеви артиљеријског оруђа (хаубице 122 mm).

Први део рада се односи на ближе упознавање тематике артиљеријског оруђа (појам, развој и класификација). Затим је приказана методологија унутрашњебалистичког пројектовања, теоријски и на конкретном примеру. Након тога је извршен унутрашњебалистички прорачун за конкретно средство. Након добијања резултата, извршено је варирање одређених улазних параметара, да би се добило што оптималније решење. Следећи део се односио на спољнобалистичке прорачуне оптималнијих решења, након којих је одабрано најоптималније. Када је одабрано најоптималније решење, извршено је димензионисање цеви и израда 3Д модела, као и поређење цеви са полазним подацима. На самом крају је извршена анализа добијених резултата и дати су закључци.

Кључне речи: пројектовање, артиљерија, хаубица, унутрашња балистика, спољна балистика, оптимално решење, димензионисање цеви, 3Д модел...

ABSTRACT

The master thesis presents the stages of designing artillery barrels (122 mm howitzer).

The first part of the paper refers to a closer acquaintance with the topic of artillery weapons (concept, development and classification). Then, the methodology of internal ballistic design is presented, theoretically and on a concrete example. After that, an internal ballistic calculation was performed for a specific weapon. After obtaining the results, certain input parameters were varied in order to obtain the most optimal solution. The next part referred to the external ballistic calculations of the more optimal solutions, after which the most optimal one was selected. When the most optimal solution was selected, the barrel was dimensioned and a 3D model was made, as well as the barrel was compared with the initial data. At the very end, an analysis of the obtained results was performed and conclusions were given.

Key words: designing, artillery, howitzer, internal ballistic (interior ballistics), external ballistics (exterior ballistics), optimal solution, barrel sizing, 3D model...

Садржај

1. Увод.....	6
2. Појам, развој и класификација артиљеријских оруђа	7
2.1. Појам артиљеријског оруђа	7
2.2. Развој артиљеријских оруђа	8
2.3. Класификација артиљеријских оруђа.....	10
2.4. Хаубице	12
2.4.1. Хаубица Д-30 Ј	12
3. Аналитичко-таблична метода унутрашњебалистичког пројектовања оруђа	20
3.1. Теоријске поставке методе Слухоцког.....	20
3.1.1. Поступак прорачуна за конкретан проблем	21
3.2. УБ пројектовање оруђа калибра 122 mm	22
4. Класични модели УБ прорачуна	25
4.1. Теоријске поставке класичних модела.....	25
4.1.1. Специфичности УБ за комбинована пуњења (метода Опокова).....	25
4.2. УБ прорачун методом Опокова	33
5. Оптимизација балистичких параметара	36
5.1. Варирање запремине барутне коморе	37
5.2. Варирање масе пројектила	39
5.3. Варирање дужине водишта пројектила.....	41
5.4. Варирање масе барута (обе врсте барута).....	41
5.5. Варирање карактеристика барута	44
5.6. Закључци варирања.....	46
6. Елементи лета пројектила	48
6.1. Теоријске поставке	48
6.1.1. Облици путање лета пројектила	48
6.1.2. Карактеристике лета пројектила у ваздушном простору - Ојлеров балистички модел	49
6.2. Прорачун аеродинамичких коефицијена датог пројектила	52
6.3. Прорачун елемената путање са програмским решењем OJL3SSK	56

7.	Пројектовање и димензионисање цеви хаубице 122 mm.....	58
7.1.	Теоријске поставке	58
7.1.1.	Еластична отпорност моноблок цеви.....	58
7.1.2.	Граница еластичне отпорности неојачане (моноблок) цеви.....	61
7.1.3.	Коефицијент сигурности цеви	63
7.2.	Методологија прорачуна моноблок цеви на чврстоћу	64
7.3.	Поступак пројектовања и димензионисања моноблок цеви	66
7.4.	Израда 3Д модела цеви у CAD софтверу	71
8.	Анализа добијених резултата	72
9.	Закључак	75
10.	Литература.....	77

1. Увод

Тенденције усавршавања постојећих и развој нових техничких система су повећање димензија, тачности, прецизности и брзине гађања. Тежи се смањењу укупне масе оруђа-оружја, ради бољих својстава тактичке и стратегијске покретљивости.

Како би се усавршили постојећи системи (смањење масе, повећавање покретљивости...) увек се полази од цеви, зато што је цев основни и најважнији, али и најтежи, систем наоружања.

Циљ овог мастер рада је представљање поступка пројектовања цеви, који је примењив и користи се за велику већину система. Осим теоријских поставки, извршени су прорачуни за већ постојеће средство, хаубицу Д-30Ј.

У овом мастер раду биће користиране теоријске поставке и знања стечена кроз досадашње образовање, из Унутрашње балистике, унутрашњебалистичког пројектовања, спољне балистике и конструкције артиљеријског оруђа. Све теоријске поставке и презентовани математички модели ће се применом савремених рачунарских алата и програмских кодова имплементирати у фазе пројектовања, да би као финалан производ добили САД модел цеви. Овакви модели су основа за даља испитивања путем симулација или међуфаза за процес коначних модела у фази производње.

Методолошки приступ који ће бити презентован, треба да послужи као основа у фази пројектовања цеви оружја-оружја, без обзира на калибар, односно процедуре које су универзалне за све типове класичног наоружања.

Након сваког прорачуна, и сваке етапе пројектовања, биће извршена упрошћена анализа, потребна за наставак прорачуна, односно за избор најоптимлнијег решења у том тренутку.

На крају самог рада, извршиће се детаљана анализа сваког прорачуна, уз табеларно поређење (у јединицама и процентуално), и изведени детаљнији закључци.

2. Појам, развој и класификација артиљеријских оруђа

2.1. Појам артиљеријског оруђа

Артиљеријским оруђем се сматра свако ватрено оруђе са калибром цеви већим од 20 mm. Ова оруђа су намењена за уништавање живе силе, техничких средстава, утврђења, и других циљева на копну, мору и у ваздуху.

Артиљеријско оруђе спада у такозвану групу класичног наоружања. Појам „класично наоружање“ је настао у време појаве и брзог развоја бројних средстава масовног уништења. Како се готово паралелно са развојем средстава масовног уништења развијала и ракетна техника, посебно техника електронских вођених пројектила, то је све оно што је раније постојало у наоружању, па и артиљеријско оруђе, постало на извесан начин класично (слика 1).

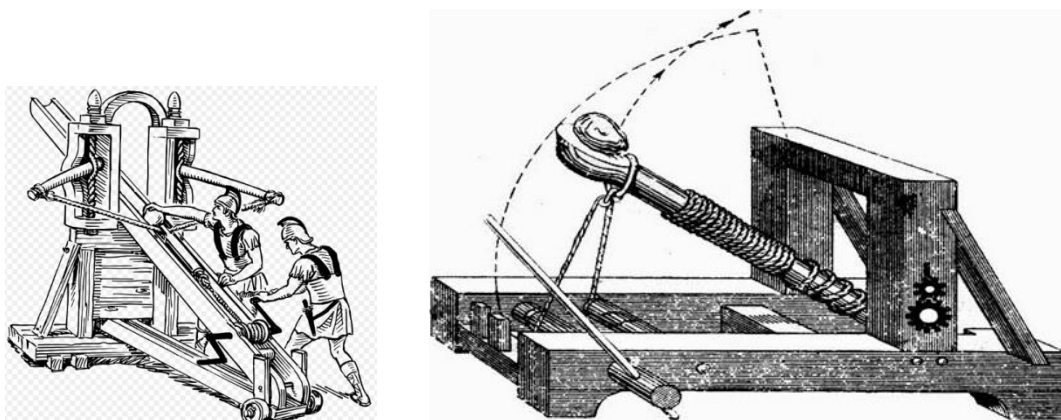


Слика 1. „Класично наоружање“ – лево; ракетно наоружање – десно [6]

Савремено артиљеријско оруђе представља сложено борбено средство способно да испали пројектил на велику удаљеност и изненадно уништи циљ. Циљеви које артиљерија уништава могу бити покретни и непокретни, заклоњени и незаклоњени, тачкасти и површински, вертикални и хоризонтални...

2.2. Развој артиљеријских оруђа

Прва остварења човекове жеље да противника туче са што веће удаљености датирају од пре више од 2000 година (балисте, катапулти, фрондиболе, итд. – слика 2). Међутим, почеци артиљерије какву свет данас познаје су много млађег датума.



Слика 2. Балиста – лево; катапулт – десно [7]

У 14. веку, појављују се прва ватрена балистичка оруђа. Појаву ових оруђа, условила је појава барута и његово увођење као погонског средства за покретање и лансирање пројектила из цеви оруђа.

Већ у 15. веку се појављују покушаји систематизације и стандардизације у производњи оружја. Прва правила која су прописана су се називала „канони“ (ова реч је касније усвојена као назив за топ, у већем броју земаља). Такође, у овом периоду се први пут појављују два појма, која су се касније усталила и данас се користе у терминологији везаној за оруђе. Појам „калибар“, која данас представља основни показатељ моћности оружја (оружја), првобитно је представљала меру за тежину пројектила (ита. „qua libra“ – колико је тешко). Како је у овом периоду почело и постављање оруђа на различита постоља различите конструкције (са крацима, ногама, итд.), појављује се термин лафет, као француска интерпретација енглеске речи „feet“, што значи нога.

У 16. и 17. веку се постављају први научни темељи за израду и употребу оруђа. Такође, у овом раздобљу долази до развоја и примене нишанских справа, што доводи до значајнијих повећања тачности и ефикасности гађања артиљеријским оруђима.

Проналажење малодимног барута, средином 19. века представља следећи већи скок у развоју артиљеријских оруђа. У то време се ради на повећању дејства пројектила на циљ, што значи да се повећава маса експлозивног пуњења, а самим тим и укупна маса пројектила. Уводе се дугуљасте пројектили, као замена за „кугле“. Да би се спречило тумбање пројектила прилоком лета кроз ваздух, ради се на жиро-стабилизацији пројектила, постизањем великог броја обртаја пројектила око уздужне осе. То је

постигнуто израдом канала са завојним жлебовима унутар цеви. Уводи се еластична веза цеви и лафета преко противтрзајућег уређаја, појављују се затварачи који за аутоматски рад користе енергију трзања цеви. Наведена побољшања су представљала велики искорак у развоју артиљеријског оруђа, јер су директно утицала на основне показатеље моћности оруђа (дејство, домет, прецизност, брзметност).

У току I светског рата, почиње подела оруђа према намени. Тако су посебно произвођена противтенковска, противавионска, тенковска, итд.

У периоду између два светска рата радило се на модернизацији постојећих система. Од најважнијих иновација издваја се гасна кочница.

Период уочи II светског рата карактерише аутоматизација управљања ватром. Прорачун елемената за гађање покретних циљева се врши помоћу рачунара.

Након II светског рата већина развоја се базирала на модернизацији постојећих система. Тежило се ка повећању домета, уз истовремено задржавање (чак и смањење) укупне масе оруђа. Осим повећања домета, циљеви су били повећати и прецизност, брзину гађања и маневарске способности оруђа.

Након II светског рата, повећање домета и ватрене моћи основних артиљеријских оруђа, одвија се кроз четири фазе надградње балистичког система:

- прва послератна генерација оруђа (дужина цеви до 30 калибара);
- друга генерација, седамдесете године 20. века (дужине цеви 39 и 40 калибара);
- трећа генерација, средина осамдесетих година 20. века (дужине цеви 45 калибара, са изузецима 52 калибара);
- четврта генерација, половина деведесетих година 20. века па до данас (дужине цеви преко 52 калибара – чак до 60 калибара).

2.3. Класификација артиљеријских оруђа

Многобројни задаци које решава артиљерија у борби захтевали су развој више врста оруђа, различитих по калибру, начину кретања, типу и борбеној намени.

Класификација артиљеријских оруђа може се извршити на основу више критеријума, и то:

1. по начину на који пројектил добија почетну брзину на:

- класична и
- реактивна;

2. по конструкцији цеви на:

- оруђа са глатком цеви и
- оруђа са ижлебљеном цеви;

3. по месту дејства и врсти циља на:

- земаљска (противтенковска и брдска),
- противавионска,
- тенковска,
- ваздухопловна,
- обалска,
- бродска;

4. по начину превозења на (слика 3):

- преносна (лака),
- вучна,
- самоходна и самопокретна;



Слика 3. Преносно оруђе – лево; вучно оруђе – у средини; самоходно оруђе – десно [6]

5. према калибру на:

- оруђа малог калибра (до 100 mm),
- оруђа средњег калибра (105 до 155 mm),
- оруђа великог калибра (преко 155 mm);

6. према основној намени у борби на:

- оруђа за подршку,
- противоклопна оруђа;

7. према конструктивно-балистичким особинама на (слика 4):

- топове,
- хаубице,
- минобацаче,
- топ-хаубице,
- ракетне бацаче (лансере).



Слика 4. Топ – лево горе; хаубица – десно горе; минобацач – лево доле; ракетни лансер – десно доле [6]

2.4. Хаубице

Хаубице су артиљеријска оруђа намењена за гађање заклоњених циљева. Да би пројектил уништио заклоњени циљ, он мора да има убацну путању. Убацна путања пројектила може се добити ако се смањи почетна брзина и повећа елевациони угао.

Смањење почетне брзине пројектила постиже се на рачун смањења масе барутног пуњења и дужине цеви. Маса барутног пуњења код хаубице износи 9-15 % од масе пројектила, дужина цеви 20-30 калибара, а почетна брзина пројектила 500-800 m/s. Највећи угао елевације износи 69-80°.

Хаубице углавном имају променљиво барутно пуњење, што омогућава 8 до 12 различитих маса барутног пуњења, чиме се постиже промена путање и домета, а да се не мења угао елевације. Маса хаубице је 2-3 пута мања од масе топа истог калибра.

2.4.1. Хаубица Д-30 Ј

Хаубица 122 mm Д-30 Ј (слика 5) намењена је за извршавање следећих борбених задатака:

- наношење губитака, неутралисање и уништавање живе силе противника ван заклона и у заклонима пољског типа;
- уништавање и наношење губитака ватреним средствима пешадије противника;
- рушење лаких бункера, жичаних препрека и других фортификацијских објеката пољског типа;
- прављење пролаза у минским пољима;
- ометање, неутралисање и вођење борбе са артиљеријом, мото-механизованим и оклопним средствима противника;
- задимљавање борбене просторије у циљу маневра властитим јединицама;
- осветљавање борбене просторије у циљу паралисања покрета противничких јединица, осматрања и извиђања те борбених дејстава јединица пешадије;
- неутралисање и ометање рада командних места и позадине противника.



Слика 5. Д-30 Ј [8]

Основни ТТ подаци о хаубици Д-30 Ј

Основни ТТ подаци о хаубици дати су у следећим табелама.

У следећој табели су дати основни балистички подаци за хаубицу Д-30 Ј:

Табела 1: Основни балистички подаци за хаубицу Д-30 Ј [9]

Калибар оруђа	122 mm
Почетна брзина пројектила	Од 600 до 750 m/s (зависно од пројектила и масе пуњења)
Највећи притисак б.г. у цеви	2600 bara
Највећа даљина гађања (домет)	Око 17500 m, са специјалним пројектиlima до 21900 m

У следећој табели су дати основни конструкциони подаци за хаубицу Д-30 Ј:

Табела 2: Основни конструкциони подаци за хаубицу Д-30 Ј [9]

Дужина цеви са гасном кочницом	4785 mm (39.5 cal)
Дужина цеви без гасне кочнице	4270 mm (35.5 cal)
Дужина жљебног дела цеви	3400 mm
Број жљебова	36
Ширина жљеба	6.6 mm
Дубина жљеба	1 mm
Ширина поља	4 mm
Дужина барутне коморе	594 mm
Поље дејства по висини	Од -7° до +70°
Поље дејства по правцу	При нагибу цеви од -5° до +18°, 360°; при осталим нагибима, 66° (између покретних кракова) и ±29° (између непокретног и покретних кракова)
Количина хидрауличне течности у кочници	10.3 l
Количина хидрауличне течности у повратнику	9.77 ^{+0.2} l
Почетни притисак ваздуха (азота) у повратнику	45 ⁺² bara
Нормална дужина трзања цеви	740-930 mm
Највећа дозвољена дужина трзања цеви	940 mm
Притисак у изравњачу при нагибу цеви од 70°	62 ^{+0.2/-0.4} bara
Количина хидрауличне течности у изравњачу	0.45 l

У следећој табели су дати најважнији подаци о димензијама за хаубицу Д-30 Ј:

Табела 3: Најважнији подаци о димензијама за хаубицу Д-30 Ј [9]

Дужина хаубице у маршевском положају	5330 mm
Ширина хаубице у маршевском положају	1950 mm
Висина хаубице у маршевском положају	1660 mm
Висина хаубице у борбеном положају при нагибу цеви од 0° (од тла до врха штита)	1420 mm
Висина ватрене линије	900 mm
Дужина хаубице у борбеном положају при углу нагиба цеви 0°	7800 mm
Растојање између тачака ослона кракова лафета у борбеном положају	5600 mm
Клиренс	325-345 mm
Ширина колотрага	1856 mm
Димензије гума	9,00-20
Растојање од осе точка до тежишта хаубице у положају за марш	Око 230 mm

У следећој табели су дати најважнији подаци о масама за хаубицу Д-30 Ј:

Табела 4: Најважнији подаци о масама за хаубицу Д-30 Ј [9]

Хаубица у борбеном положају	3350 kg
Хаубица у маршевском положају	3440 kg
Цев	1050 kg
Затварач	61 kg
Делови покретни по висини	1500 kg
Трзајући делови	1230 kg
Колевка	200 kg
Кочница у склопљеном стању	75 kg
Повратник у склопљеном стању	73 kg
Изравњач	34 kg
Горњи лафет	190 kg
Доњи лафет са непокретним краком	320 kg
Покретни кракови (оба)	300 kg
Точак (са главчином без делова кочног уређаја)	190 kg

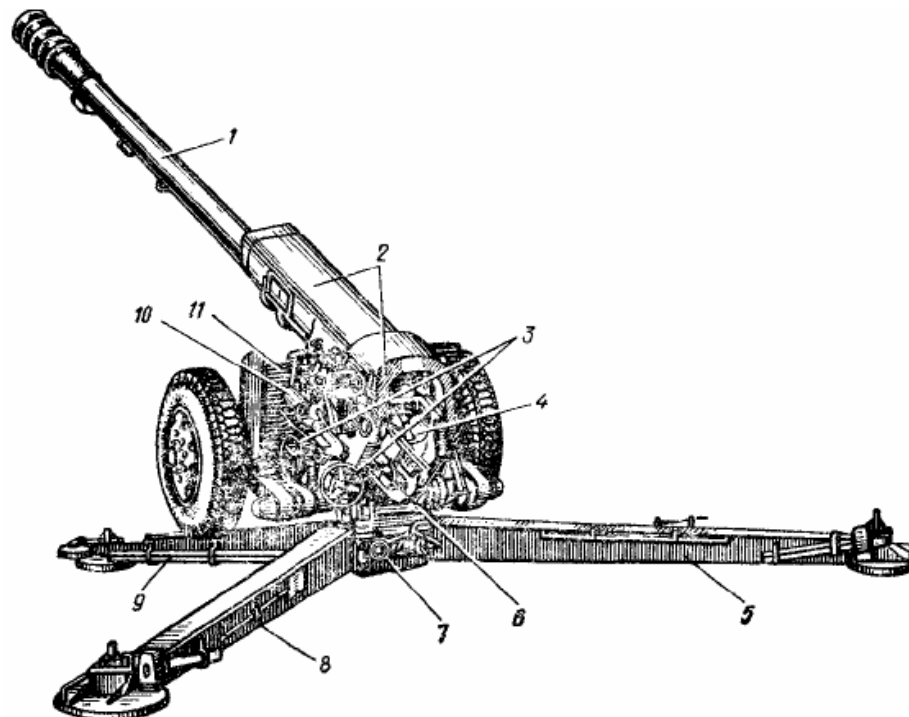
У следећој табели су дати најважнији експлоатациони подаци за хаубицу Д-30 Ј:

Табела 5: Најважнији експлоатациони подаци за хаубицу Д-30 Ј [9]

Брзина гађања	6 до 8 прој./мин
Време преласка из маршевског у борбени положај	1.5 до 2.5 мин
Највећа брзина кретања по добрим путевима (асфалт, бетон...)	до 60 km/h
Сила притиска ашова на тло	2 kN
Сила притиска ока за вучу на куку вучног возила	1.8 kN

Основни подаци о конструкцији и борбеној употреби хаубице

На слици 6 се налази хаубица Д-30 са приказаним позицијама главних делова и склопова.



Слика 6. Д-30 Ј, основни склопови и делови: 1-склоп цеви; 2-колевка; 3-механизми за навођњење по азимуту и елевацији; 4-задњак са затварачем; 5 и 8-покретни кракови; 6-горњи лафет; 7-доњи лафет; 9-непокретни крак; 10-нишанска справа; 11-штитови [8]

Цев је моноблок са гасном кочницом оком за вучу на гасној кочници. Са задњаком се спаја преко навртке задњака. На цеви су и две огрице са клизачима за везу са колевком.

Затварач је вретикално-клинасти са полуаутоматиком механичког типа. Да би се олакшало пуњење и да би се онемогућило испадање пројектила из унутрашњости цеви приликом пуњења при великим угловима нагиба цеви, на горњој површини тела затварача уграђен је задржач, који се приликом затварања затварача аутоматски утапа у тело затварача и не омета избацивање чауре.

Окидање се врши помоћу ручице механизма за окидање, која је смештена на бранику, са леве стране.

Механизам за окидање је у вези са граничником, којим се онемогућава окидање када је задњак изнад кракова лафета, а угао нагиба цеви је већи од 18° .

Колевка има тело и рамена колевке. Рамена колевке леже у одговарајућим лежиштима горњег лафета. У телу колевке је смештен ПТУ (противтрзајући уређај – кочница и повратник) чије су клипњаче везане за предњи део колевке, а цилиндри утврђени у огрлицама задњака, и трзају се заједно са цеви.

За колевку су заварени и носач нишанских справа, носач изравњача и носач зупчастог сектора механизма за давање нагиба цеви.

Повратник је хидропнеуматски. Напуњен је са 9.77 l специјалног уља HUNT-S (хидраулично уље за ниске температуре - средње) и азотом или ваздухом. Нормални притисак у повратнику је 45^{+2} bara.

Хидраулична кочница је вретенастог типа са профилисаном контраклипњачом и опружним компензатором. Напуњена је са 10.3 l хидрауличног уља HUNT-S.

Горњи лафет носи делове оруђа покретне по висини. У његовом доњем делу смештени су носачи путне осовине. За посебан носач, на левој страни горњег лафета, везано је кућиште механизма за давање нагиба цеви. Механизам за давање нагиба цеви је секторског типа.

Механизам за давање правца цеви је пужног типа. Обезбеђује оруђу кружно дејство. Механизам је везан за леву страну горњег лафета. Пуж је смештен у ексцентричној чаури, која омогућава искључивање механизма у случају брзе промене правца гађања и при превођењу оруђа из борбеног у маршевски положај и обратно.

Изравњач је пнеуматски, гурајућег типа. Намењен је за уравнотежавање делова оруђа покретних по висини у читавом угловном секторупокретања колевке са цеви и за олакшавање подизања точкова при превођењу хаубице из маршевског у борбени положај. Изравњач је смештен на десној страни оруђа. Састоји се од два телескопски везана цилиндра. Горњи, покретни ослонац изравњача учвршћен је за носач на колевци, а као доњи ослонац служи ослонац полуга механизма за подизање точкова.

Доњи лафет је ливена конструкција. На горњи део доњег лафета је заварено пужно коло са којим је спрегнут пуж механизма за покретање цеви по правцу. За доњи лафет су везана и три крака. Један од њих је заварен (самим тим и непокретан), док су друга два шарнирно везана са доњим лафетом (и покретна су).

Краци су заварене конструкције, правоугаоног профила. На крају кракова су заварене ослоне плоче, са отворима за ашове, преко којих се оруђе ослања на тло у борбеном положају. У маршевском положају краци су међусобно спојени преклопном стезаљком, а подупирачем (у облику рама), везани за цев. У борбеном положају, краци су растављени и утврђивачима спојени са доњим лафетом. У непокретном крају су

смештени резервоар за ваздух и вентил пнеуматске кочнице, а на спољашњој површини, посебним носачима, утврђени су водови кочне и електроинсталације.

Нишанске справе су намењене за усмеравање оруђа на циљ. За непосредно гађање по непокретним и покретним циљевима користи се оптички нишан ON-122-M78. За гађање заклоњених положаја (посредно гађање) користи се панорама Р-78 са даљинаром М-78. Ако је неопходно, панорама може да се користи и за непосредно гађање. Обе нишанске справе су уграђене на колевку са леве стране и везане на њу преко носача оптичких справа. При ноћним гађањима, нишанске справе се осветљавају приором РО-М78 или аутономним трицијумским осветљењем. [9]

Хаубица 122 mm Д-30 код нас

У оперативну употребу су уведене 1960. године, а први примерци су у Југославију увезени из Совјетског Савеза 1974. године. На основу делимичне техничке документације организована је домаћа производња побољшаног модела Д-30 Ј. Хаубице Д-30 Ј произвођене су у фабрици „Братство“ у Новом Травнику. У односу на оригиналну хаубицу, главна предност побољшане је у остваривању већег домета са домаћим тренутно-фугастим пројектилом.

У наоружању наших оружаних снага налазе се два модела овог оруђа:

- хаубица 122 mm Д-30 и
- хаубица 122 mm Д-30Ј.



Слика 7. Д-30 – лево; Д-30 Ј - десно [8]

Хаубица 122 mm Д-30Ј се разликује од хаубице 122 mm Д-30 (изворног модела) у следећем:

- заптивање у хидрауличној кочници, повратнику и изравњачу је помоћу пербунанских „О“ прстенова уместо прештуљастих заптивача; користи се уље HUNT-S уместо STEOL-M;
- механичка дизалица је замењена хидрауличном, коју покреће ручна хидраулична пумпа;
- гасна кочница је двокоморна уместо гасне кочнице са шест реда отвора; промењена је веза ока за вучу са гасном кочницом;
- подвозак је опремљен пнеуматском путном кочницом и механичком ручном кочницом;
- точкови су снабдевени пумпаним гумама;
- непокретни крак је дефинисан тако да су у њега и на њему смештени делови кочионог система, као и кочионе и електричне инсталације;

- нишанске справе су опремљене аутономним (без посебног извора) осветљењем на бази трицијумске масе уз реконструисани прибор за осветљавање (РО-М78);
- заптивање ваздушно-хидрауличне пумпе је помоћи О-прстенова и специјалних тефлонских заштитних прстенова;
- остале конструктивне разлике су проузроковане горе наведеним конструктивним изменама.

3. Аналитичко-таблична метода унутрашњебалистичког пројектовања оруђа

3.1. Теоријске поставке методе Слухоцког

УБ пројектовање је део унутрашње балистике – фундаменталне научне дисциплине у области наоружања. Под УБ пројектовањем подразумева се одређивање оптималних основних конструктивних карактеристика цеви, услова пуњења и енергетских карактеристика на основу захтева који се поставља пред оруђе. Другим речима, треба дефинисати низ параметара везаних одговарајућим УБ једначинама на основу одређеног броја познатих података.

УБ пројектовање задатог оруђа је извршено методом Слухоцког. Метода Слухоцког је аналитичка метода, зато што се при прорачуну користи доста израза из теорије. Међутим, у овој методи има и доста елемената табличних метода, па се она на неки начин може сврстати и у ову групу метода. Најкоректније би било рећи да је метода Слухоцког прелазна варијанта између табличних и аналитичких метода.

Као помоћно средство за извођење прорачуна користе се таблице ГАУ, као и две помоћне табеле које је израдио Слухоцки.

Критеријум за одређивање оптималног решења Слухоцки је дефинисао на следећи начин:

Балистичко решење се може окарактерисати следећим параметрима:

- коефицијентом искоришћења јединице пуњења Km_b ;
- коефицијентом искоришћења дужине цеви K_L ;
- радним веком цеви N .

Решење је боље уколико су ови параметри већи. Међутим, очигледно је да се са повећањем Km_b , смањују K_L и N , па је због тога потребно објединити, односно пронаћи најоптималнији однос параметара. У тренутцима стварања ове методе, није било могуће промаћи аналитичку везу између ових параметара. Критеријум за остваривање везе је добијен тзв. хеуристичким путем, тј. параметри су везани у облику производа, а степен њиховог утицаја одређен је на основу тада важећих мишљења да је приоритет добити што краћу цев, док је живот цеви био мање важан. На основу наведеног, Слухоцки је предложио следећи критеријум:

$$Z = Km_b K_L^4 \sqrt{N} \quad (3.1.1)$$

Живот цеви, Слухоцки је дефинисао изразом:

$$N = K_n \frac{\lambda_u + 1}{\frac{m_b}{m} \lambda_u v_0^2 \left(\frac{v_1}{v_0}\right)^2} \quad (3.1.2)$$

где су:

- K_n средњи број опаљења, а
- v_1 брзина струјања у „грлу“ канала, тј. на крају прелазног конуса.

Однос v_1/v_0 даје се у табели 3.2 [] улазним параметрима λ_u и χ_n , где је:

$$\chi_n = \frac{1}{\frac{1}{\chi} + \frac{0.75d}{X_0}} \quad (3.1.3)$$

Замењујући Km_b , K_L и N у критеријуму Слухоцког и уводећи ознаку:

$$M = \frac{mv_0^9}{2} \sqrt{K_n m}, \quad (3.1.4)$$

добива се:

$$Z = M \frac{1}{m_b L_c^4 \frac{v_1}{v_0}} \sqrt{\frac{\lambda_u + 1}{m_b \lambda_u}} \quad (3.1.5)$$

Оптимално решење је оно које има највећи вредност Z . [1]

3.1.1. Поступак прорачуна за конкретан проблем

Поступак прорачуна за конкретан проблем је следећи:

1. рачуна се K_e према (1.10)[1];
2. из табеле 3.1, зависно од K_e , одређује се p_{mkr} , ρ , χ , Km_b , L_c и рачуна се m_b према (1.11);
3. изводи се низ приближних прорачуна за одређивање различитих карактеристика (без узимања у обзир проширење барутне коморе). Притом се m_b мења за 5 до 10%. Ако се претпоставља флегматизовано пуњење, максимални крешерни притисак се смањује за 3%, а почетна брзина се повећава за 0.5%. Прорачуни се извод све док се не нађе m_b за који је вредност Z највећа;
4. уколико добијена дужина не задовољи задату (а то је условљено), повећа се p_{mkr} (обично за 10%) и понавља се прорачун из тачке 3. При повећању p_{mkr} , треба повећати и ρ . При прорачуну треба водити рачуна и о осталим ограничењима;
5. за изабрано m_b се изводи тачнији прорачун, имајући у виду и χ . [1]

3.2. УБ пројектовање оруђа калибра 122 mm

Почетни подаци, према којима је извршено УБ пројектовање оруђа калибра 122 mm су следећи:

1. Калибар оруђа: 122 mm ;
2. Маса пројектила: 27.76 kg и
3. Почетна брзина пројектила: 690 m/s .

Решење:

На основу почетних параметара рачунасе K_e , на следећи начин:

$$K_e = \frac{mv_0^2}{2d^3} = 2.853 \cdot 10^9 \text{ J/m}^3$$

Из табеле 3.1. [1], следи да су:

$$p_{mkr} = 216.25 \text{ MPa} \quad , \quad \rho = 584 \text{ kg/m}^3 \quad , \quad \chi = 1.17 \quad , \quad Km_b = 117.45 \cdot 10^4 \text{ J/kg} \quad ,$$

$$Km = \frac{m}{d^3} = 11983 \text{ kg/m}^3 \quad .$$

Због $Km \approx 10^4$ треба повећати p_{mkr} за 5%. Због флегматизатора треба p_{mkr} смањити за 3%, а почетну брзину повећати за 0.5%.

Тада су: $p_{mkr} = 220.25 \text{ MPa}$, $v_0 = 693.45 \text{ m/s}$.

Попречни пресек цеви је:

$$Sc = 0.81 \cdot d^2 = 1.21 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$$

Следи да је маса барута:

$$m_b = \frac{mv_0^2}{2Km_b} = 4.455 \text{ kg}$$

За потребе порачуна се користи добијена маса барута, маса барута увећана за 5% и маса барута увећана за 10% .

У следећој табели су приказани резултати прорачуна.

Табела 6: Прорачун методом Слухоцког

Образац	Резултати		
m_b	4.455	4.678	4.9
$W_0 = \frac{m_b}{\rho}$	$7.6 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$8.4 \cdot 10^{-3}$
$X_0 = \frac{W_0}{S_c}$	0.633	0.664	0.696
$\varphi = 1.03 + \left(\frac{1}{3}\right) \cdot m_b / m$	1.098	1.102	1.105
$p_m = \frac{1.12 \cdot \varphi \cdot p_{mkr}}{1.02 \cdot \left(1 + \frac{1}{2} \cdot \frac{m_b}{m}\right)}$	240.9	240.6	240.2
$v_{tab} = v_0 \sqrt{\frac{\varphi m}{m_b}}$	1606	1569	1528
λ_u (таблице ГАУ)	5.23	4.78	4.32
$X_u = X_0 \cdot \lambda_u$	3.306	3.174	3.008
$X_{kom} = \frac{X_0}{\chi}$	0.542	0.57	0.597
$L_c / d = \frac{X_{kom} + X_u}{d} + 1.5$	33.047	32.184	31.044
$\chi_n = \frac{1}{\frac{1}{\chi} + \frac{0.75d}{X_0}}$	0.998	1.005	1.011
v_1 / v_0 (табела 3.2. [1])	0.176	0.194	0.188
Z (са $M = 1000$)	2.496	2.358	2.665

Из претходне табеле се види да је по критеријуму Z најбоља трећа варијанта (највећа вредност).

Одабира се варијанта 3 и за њу се изводи тачнији прорачун (табела 7):

Табела 7: Тачнији прорачун

Образац	Резултати
$\lambda_1 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\lambda_u + 1/\chi}{\lambda_u + 1}$	0.478
$\lambda_2 = 2\lambda_1/3$	0.324
$\varphi = 1.03 + \lambda_2 \cdot m_b/m$	1.103
$p_m = \frac{1.12 \cdot \varphi \cdot p_{mkr}}{1.02 \cdot \left(1 + \lambda_1 \cdot m_b/m\right)}$	240.4
$v_{tab} = v_0 \sqrt{\frac{\varphi m}{m_b}}$	1534
λ_u (таблице ГАУ)	4.39
$X_u = X_0 \cdot \lambda_u$	3.052
$L_c/d = \frac{X_{kom} + X_u}{d} + 1.5$	31.407

Тако се коначно добијају следећи резултати:

$$W_0 = 8.4 \cdot 10^{-3} m^3, \quad Sc = 1.21 \cdot 10^{-2} m^2, \quad X_u = 3.052 m, \quad \chi = 1.17, \quad m_b = 4.9 kg, \quad m = 21.76 kg, \\ L_c/d = 31.407, \quad p_{mkr} = 240.4 MPa \text{ и } v_0 = 693.5 m/s.$$

На крају се рачуна укупни импулс. Из таблица ГАУ, за $\rho = 584 kg/m^3$ и $p_{mkr} = 240.4 MPa$, добија се вредност параметра $B = 1.92$.

Тада је:

$$I_k = \frac{1}{Sc} \sqrt{B \cdot \varphi \cdot m \cdot f_b \cdot m_b} = 1.2 \cdot 10^6 Pa$$

4. Класични модели УБ прорачуна

4.1. Теоријске поставке класичних модела

За решење основног задатка унутрашње балистике, тј. одређивање законитости развоја притиска барутних гасова и кретања пројектила у цеви оруђа – оружја, треба развити одређену теорију, односно дефинисати неопходне зависности између карактеристичних величина. Практично, основни задатак унутрашње балистике је да се одреде услови које треба да испуни барутно пуњење да би пројектил у тренутку напуштања уста цеви имао почетну брзину v_0 , а да при томе у цеви и барутној комори вредност максималног притиска барутних гасова p_m не пређе дозвољену границу.

Теорија која се претежно примењује потиче од страних аутора. У почетку је преовладавала теорија француских аутора, а касније теорија из совјетских извора.

Данас су најзаступљеније ове методе:

1. За оруђа – оружја са једноделном муницијом (топови, стрељачко оружје и хаубице које гађају једном врстом барута), метода Дроздова и метода Рунге-Кута;
2. За оруђа са дводелном муницијом (хаубице које користе комбинацију две врсте барута), метода Опокова;
3. За бестрзајна оруђа, метода Серебрјакова;
4. За минобацаче, метода Серебрјакова.

4.1.1. Специфичности УБ за комбинована пуњења (метода Опокова)

Значајан део артиљеријских, противтенковских и тенковских оруђа користи комбинована пуњења од смеше два типа барута. Таква пуњења се користе када треба да се добију одређене комбинације почетне брзине пројектила и максималних притисака у цеви оруђа, при чему се коришћењем једне врсте барута такве комбинације брзине и притиска не могу добити. У таквим случајевима се део пуњења једне врсте замењује пуњењем од тањег или дебљег барута уз одређену измену укупне масе пуњења.

Ти барути су углавном различитих дебљина и могу да имају различит облик, као и различите балистичке карактеристике (специфичан ради, коволумен и брзину сагоревања). У пракси комбинована пуњења се најчешће примењују при гађању из хаубица, при чему је број пуњења 5-10.

Основно пуњење је обично од грануларног једноканалног барута, а допунска пуњења су од седмоканалног барута. И основни и допунски барут се смештају у кесе, које се стављају у чауру, како би се лако и брзо могао извадити из чауре одрешени број кеса и добити пуњење које даје жељену брзину.

Метода Опокова служи за унутрашњемалистички прорачун код оруђа са комбинованим пуњењем. Идеја ове методе је да се за смешу барута дефинишу заједничке карактеристике. Када се то уради, може се говорити о једном баруту и може се развити математички модел идентичан методи Дроздова. Претпоставља се да ће тањи барут пре да сагори, односно да су брзине сагоревања тањег и дебљег барута готово исте. Први период се дели на две фазе. Прва фаза је једноремено сагоревање оба барута, а друга догоревање дебљег барута.

Ако се карактеристике тањег барута означе знаком ('), а дебљег знаком ("), онда су карактеристике смеше барута следеће:

- укупна маса барута:

$$m_b = m_b' + m_b'' \quad (4.1.1)$$

- односи маса:

$$i' = \frac{m_b'}{m_b} \quad (4.1.2)$$

$$i'' = \frac{m_b''}{m_b} \quad (4.1.3)$$

- густина пуњења:

$$\Delta = \frac{m_b}{W_0} \quad (4.1.4)$$

- запреминска маса смеше:

$$\rho_b = \frac{\rho_b' \rho_b''}{i' \rho_b'' + i'' \rho_b'} \quad (4.1.5)$$

- коволумен барутних гасова:

$$\alpha = i' \alpha' + i'' \alpha'' \quad (4.1.6)$$

- енергија барута:

$$e_b = i' e_b' + i'' e_b'' \quad (4.1.7)$$

- укупни импулси:

$$I_k' = \frac{r_0'}{u_{z0}'} \quad (4.1.8)$$

$$I_k'' = \frac{r_0''}{u_{z0}''} \quad (4.1.9)$$

$$I_k = \frac{I_k'}{I_k''} \quad (4.1)$$

Систем једначина за методу Опокова чине:

- једначина енергије - основна једначина унутрашње балистике:

$$pS_c (X_\psi + X) = f_b m_b \psi - \frac{\theta}{2} \varphi m V^2 \quad (4.1.11)$$

Где је:

$$X_\psi = X_0 \left[1 - \frac{\rho}{\rho_b} \psi \left(\alpha - \frac{1}{\rho_b} \right) \right] \quad (4.1.12)$$

$$X_0 = \frac{W_0}{S_c} \quad (4.1.13)$$

- једначина кретања пројектила:

$$\varphi m \frac{dV}{dt} = pS_c \quad (4.1.14)$$

- промена релативне сагореле дебљине дебљег барута:

$$\frac{dy''}{dt} = \frac{p}{I_k''} \quad (4.1.15)$$

- релативна сагорела маса барута:

За прву фазу:

$$\psi = \kappa_1 y'' (1 + \lambda_1 y'') \quad (4.1.16)$$

Где је:

$$k_1 = \frac{i' k_1'}{I_k} + i'' k_1'' \quad (4.1.17)$$

$$\lambda_1 = \frac{1}{k_1} \left(\frac{i' k_1' \lambda_1'}{I_k^2} + i'' k_1'' \lambda_1'' \right) \quad (4.1.18)$$

За другу фазу:

$$\psi = i' + i'' \kappa_1'' y'' (1 + \lambda_1'' y'') \quad (4.1.19)$$

- релативна сагоревајућа површина барутног зрна:

За прву фазу:

$$\sigma = 1 + 2\lambda_1 y'' \quad (4.1.20)$$

За другу фазу:

$$\sigma = 1 + 2\lambda_1' y'' \quad (4.1.21)$$

Претходни период

У претходном периоду нема кретања пројектила већ постоји само сагоревање барута у сталној запремини.

За познати притисак форсирања p_0 , уз услове $X = V = 0$, за крај претходног периода из једначине (4.1.11) следи:

$$\psi_0 = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho_b}}{\frac{f_b}{p_0} + \alpha - \frac{1}{\rho_b}} \quad (4.1.22)$$

Из једначине (4.1.16) следи:

$$y_0'' = \frac{\sigma_0 - 1}{2\lambda_1} \quad (4.1.23)$$

Где је:

$$\sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{k_1} \psi_0} \quad (4.1.24)$$

Први период - прва фаза

За први период се уводи независна променљива:

$$x = y'' - y_0'' \quad (4.1.25)$$

Њена вредност се мења од 0 до $x_k = y_k'' - y_0''$.

Из једначина (4.1.16) и (4.1.25) следи:

$$\psi = \psi_0 + k_1 x + \kappa_1 \lambda_1 x^2 \quad (4.1.26)$$

Где је:

$$k_1 = \kappa_1 \sigma_0 \quad (4.1.27)$$

$$\sigma_0 = 1 + 2 \lambda_1 y_0'' \quad (4.1.28)$$

На крају прве фазе за $x = x_k$ добија се $\psi = \psi_k$.

Из једначина (4.1.14), (4.1.15) и (4.1.25), интегралењем се добија израз за брзину пројектила:

$$V = \frac{S_c I_k''}{\varphi m} x \quad (4.1.29)$$

Полазећи од једначине (4.1.11) добија се једначина пута. Уводе се ознаке:

$$B'' = \frac{S_c^2 I_k''^2}{f_b m_m \varphi m} \quad (4.1.30)$$

$$B_1'' = \frac{B'' \theta}{2} - \kappa_1 \lambda_1 \quad (4.1.31)$$

$$\gamma_1 = \frac{B_1''}{k_1''} \psi_0 \quad (4.1.32)$$

$$b_1 = \sqrt{1 + 4\gamma_1} \quad (4.1.33)$$

$$X_{\psi sr} = X_0 \left[1 - \frac{\Delta}{\rho_b} - \Delta \left(\alpha - \frac{1}{\rho_b} \right) \psi_{sr} \right] \quad (4.1.34)$$

$$\beta_1 = \frac{B_1''}{k_1} x \quad (4.1.35)$$

$$Z_1 = \left(1 - \frac{2}{b_1 + 1} \beta_1 \right)^{\frac{b_1 + 1}{2b_1}} \left(1 + \frac{2}{b_1 - 1} \beta_1 \right)^{\frac{b_1 - 1}{2b_1}} \quad (4.1.36)$$

$$X = X_{\psi sr} \left(Z_1^{\frac{-B_1''}{2b_1}} - 1 \right) \quad (4.1.37)$$

Први период - друга фаза

Из једначина (4.1.19) и (4.1.25) следи:

$$\psi = \psi_{02} + i'' k_1'' x + i'' \kappa_1'' \lambda_1'' x^2 \quad (4.1.38)$$

$$\psi_{02} = i' + i'' \psi_0'' \quad (4.1.39)$$

$$\psi_0'' = \kappa_1'' y_0'' (1 + \lambda_1'' y_0'') \quad (4.1.40)$$

$$k_1'' = \kappa_1'' \sigma_0'' \quad (4.1.41)$$

$$\sigma_0'' = 1 + 2\lambda_1'' y_0'' \quad (4.1.42)$$

Приликом извођења једначина за пут пројектила уводе се следеће ознаке:

$$B_2'' = \frac{B'' \theta}{2} - i'' \kappa_1'' \lambda_1'' \quad (4.1.43)$$

$$\gamma_2 = \frac{B_2'' \psi_{02}}{(i'' k_1'')^2} \quad (4.1.44)$$

$$b_2 = \sqrt{1 + 4\gamma_2} \quad (4.1.45)$$

$$\psi_{sr} = \frac{\psi + \psi_{k'}}{2} \quad (4.1.46)$$

$$\beta_2 = \frac{B_2''}{i'' k_1''} x \quad (4.1.47)$$

$$Z_{II} = \left(1 - \frac{2\beta_1}{b_2 + 1}\right)^{\frac{b_2 + 1}{2b_2}} \left(1 + \frac{2}{b_2 - 1} \beta_2\right)^{\frac{b_2 - 1}{2b_2}} \quad (4.1.48)$$

За почетак друге фазе, за $x = x_k$, из једначина (4.1.47), (4.1.26) и (4.1.48) добија се:

$$\beta_{k'} = \frac{B_2''}{i'' k_1''} x_{k'} \quad (4.1.49)$$

$$\psi_{k'} = \psi_0 + k_1 x_{k'} + \kappa_1 \lambda_1 x_{k'} \quad (4.1.50)$$

$$Z_{k'} = \left(1 - \frac{2\beta_{k'}}{b_2 + 1}\right)^{\frac{b_2 + 1}{2b_2}} \left(1 + \frac{2\beta_{k'}}{b_2 - 1}\right)^{\frac{b_2 - 1}{2b_2}} \quad (4.1.51)$$

Тако је:

$$X = X_{\psi sr} \left[\left(1 + \frac{X_{k'}}{X_{\psi sr}}\right) \frac{Z_{k'}^{\frac{B'}{B_2}}}{Z_{II}^{\frac{B'}{B_2}}} - 1 \right] \quad (4.1.52)$$

Где је:

$x_{k'}$ - пут пројектила на крају прве фазе.

Брзина пројектила се добија из једначине (4.1.29), а притисак барутних гасова из једначине (4.1.11).

Други период

Други период траје од краја сагоревања барута до момента изласка пројектила из цеви. Независна променљива у том периоду је пут пројектила који се мења од X_k до X_u

$$p = p_k \left(\frac{X_1 + X_k}{X_1 + X} \right)^{1+\theta} \quad (4.1.53)$$

Ако се основна једначина унутрашње балистике напише за произвољан моменат у другом периоду и за почетак другог периода, следи:

$$V = V_{\lim} \sqrt{1 - \left(\frac{X_1 + X_k}{X_1 + X} \right)^\theta - \left(1 - \frac{V_k^2}{V_{\lim}^2} \right)} \quad (4.1.54)$$

Температура се рачуна из:

$$T = T_m \left(1 - \frac{V^2}{V_{\lim}^2} \right) \quad (4.1.55)$$

За $X = X_u$ добијају се карактеристике на устима цеви: p_u , T_u и V_0 .

Максимални притисак барутних гасова се може постићи у првој или другој фази првог периода. Деривацијом основне једначине унутрашње балистике, уз услов $\frac{dp}{dt} = 0$, добијају се услови за максималан притисак:

- за прву фазу:

$$X_m = \frac{\kappa_1 \sigma_0}{\frac{B''(1+\theta)}{1 + \left(\alpha - \frac{1}{\rho_b} \right) \frac{p_m}{f_b}} - 2\lambda_1 \kappa_1} \quad (4.1.56)$$

- за другу фазу:

$$X_m = \frac{i'' \kappa_1'' \sigma_0''}{\frac{B''(1+\theta)}{1 + \left(\alpha - \frac{1}{\rho_b} \right) \frac{p_m}{f_b}} - 2i'' \kappa_1'' \lambda_1''} \quad (4.1.57)$$

4.2. УБ прорачун методом Опокова

При УБ прорачуну, коришћени су реални конструктивни подаци већ постојеће хаубице, као и подаци за тренутно-фугасни пројектил ТФ 462, са пуним барутним пуњењем М78.

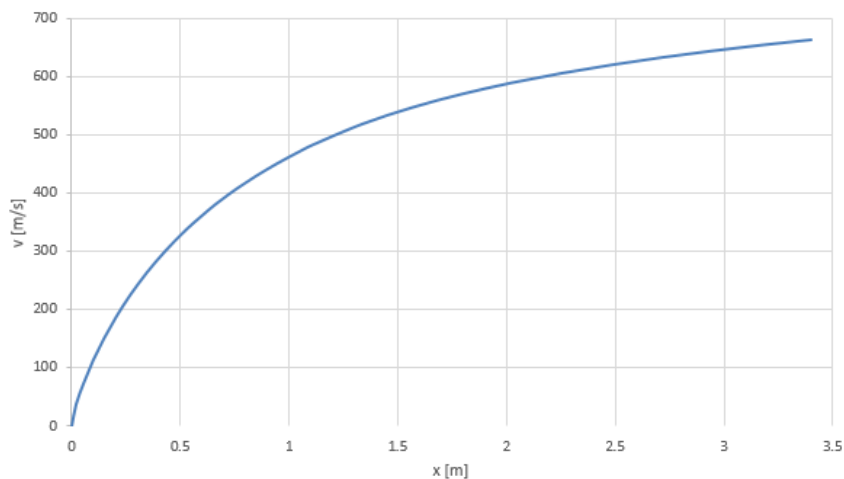
Пуно барутно пуњење М78 је комбиновано, и састоји се од два нитроцелулозна барута: НЦ-43 (3.6 kg) и НЦ-122 (0.2 kg).

У следећој табели су приказани полазни подаци за УБ прорачун.

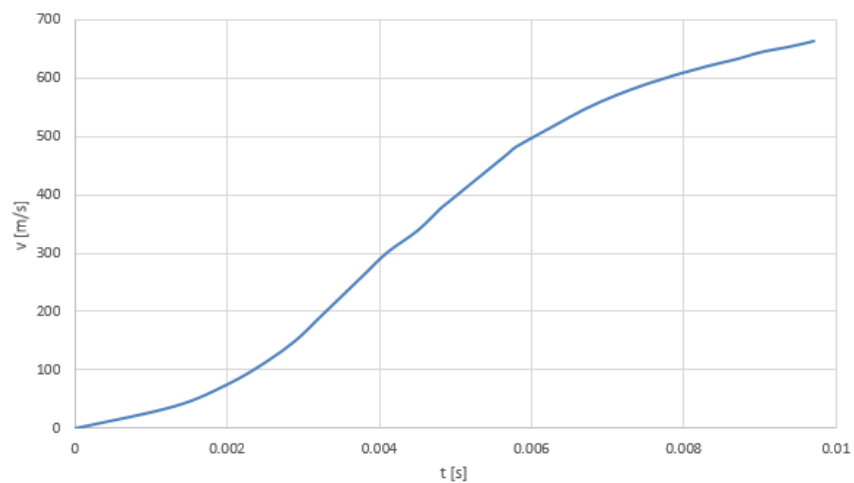
Табела 8: Полазни подаци за УБ прорачун

Ознака	Вредност		Јединица
	(НЦ-122)	(НЦ-43)	
W_0	0.00687		m^3
Sc	0.011967		m^2
X_u	3.4		m
φ	1.11812		/
m	21.76		kg
m_b	0.2	3.6	kg
ρ_b	1600	1600	kg/m^3
α	0.0098	0.0099	m^3/kg
θ	0.262		/
r_0	0.00066	0.00084	m
κ_1	1.00464	1.11936	/
λ_1	-0.00462	-0.10663	/
f_b (НЦ-122)	961234	958391	J/kg
p_0	$30 \cdot 10^6$		Pa
u_{z0} (НЦ-122)	$0.848 \cdot 10^{-9}$	$0.833 \cdot 10^{-9}$	m/sPa

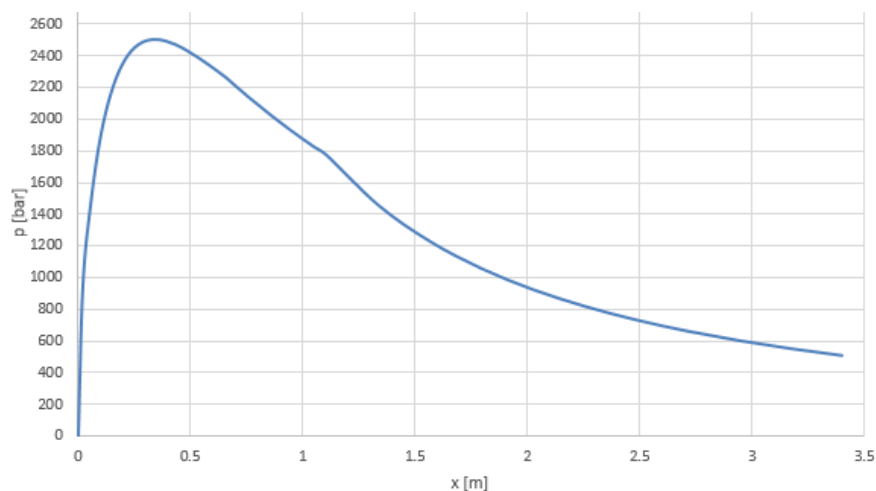
На дијаграмима у наставку се могу видети графички приказани резултати.



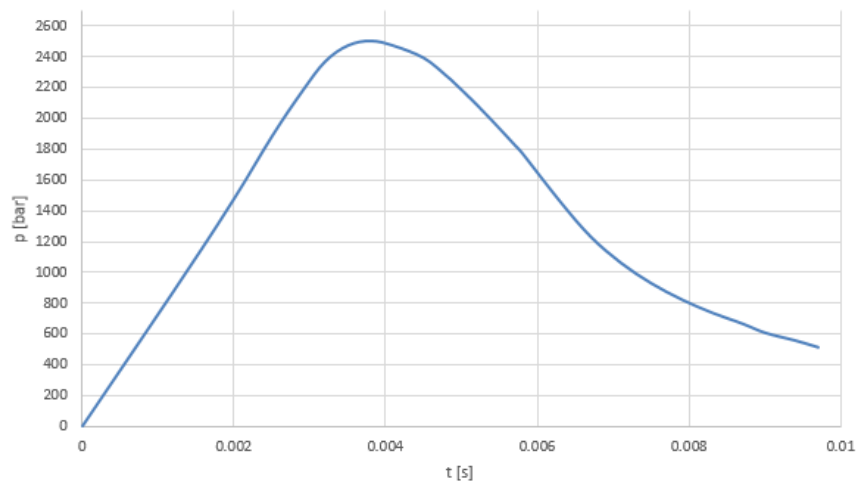
Дијаграм 1. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 2. Зависност брзине од времена



Дијаграм 3. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 4. Зависност притиска од времена

5. Оптимизација балистичких параметара

Варирање појединих параметара врши се са циљем налажења оптималног решења. Циљ је повећати почетну брзину, а да притисак остане испод граничне вредности (вредности до које цев може издржати). Такође, мора се водити рачуна да не дође до непотпуног сагоревања.

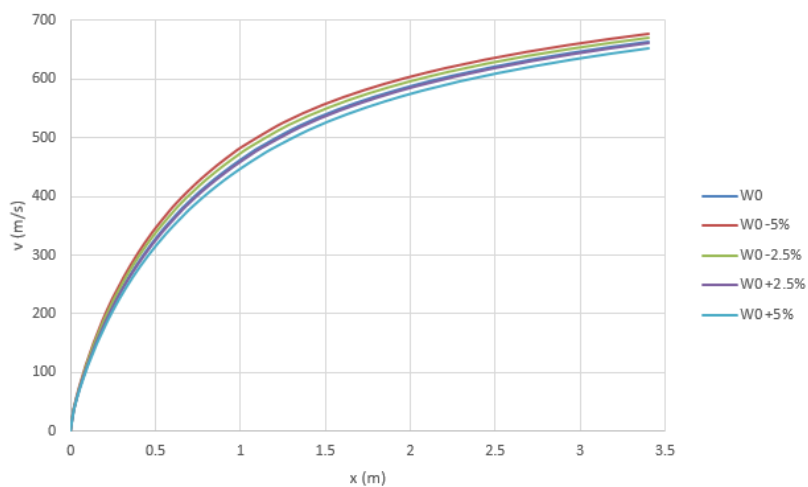
Варираће се по један параметар, док остали параметри задржавају почетну вредност. Одређени параметри ће бити варирани у опсегу $\pm 5\%$, док ће неки бити варирани у опсегу $\pm 10\%$ (у оба случаја варирање ће бити у 5 корака, а инкременти 2.5% или 5%).

Параметри који ће бити варирани:

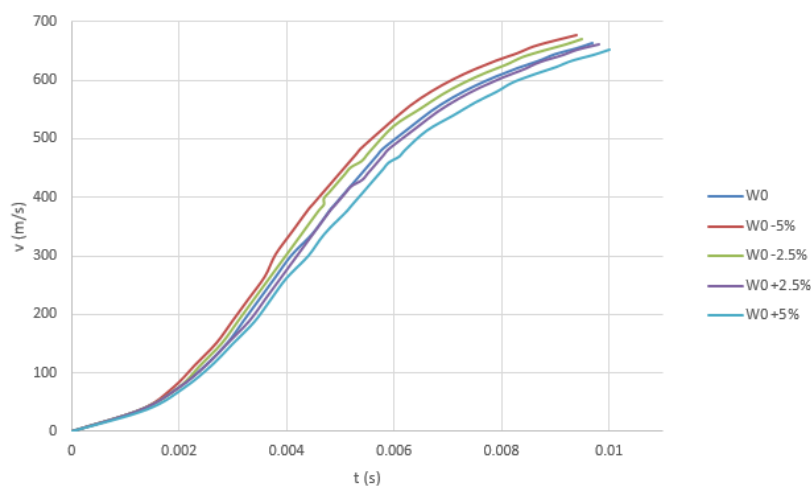
- Запремина барутне коморе (W_0),
- Маса пројектила (m),
- Дужина водишта пројектила (X_u),
- Маса барута – обе врсте (m_b),
- Карактеристике барута.

5.1. Варирање запремине барутне коморе

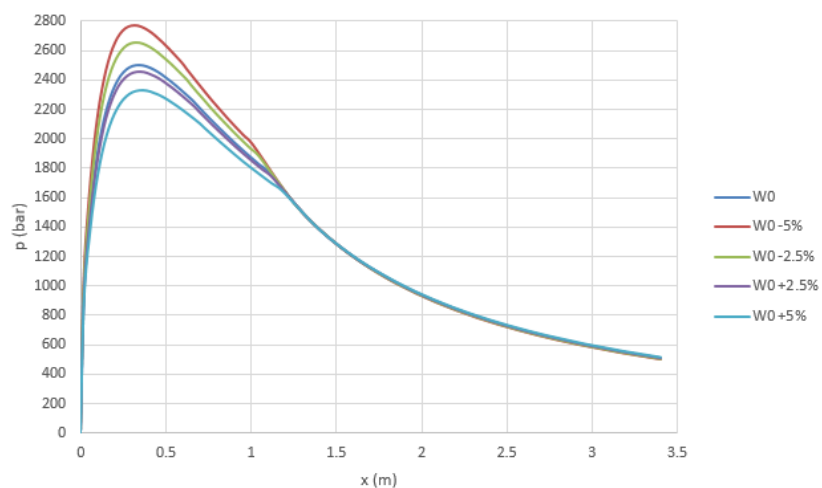
Први параметар за који је извршено варирање је запремина барутне коморе. Запремина барутне коморе (W_0), варирана је у опсегу $\pm 5\%$ (инкремент 2.5%) и добијени резултати су приказани на следећим дијаграмима и табели:



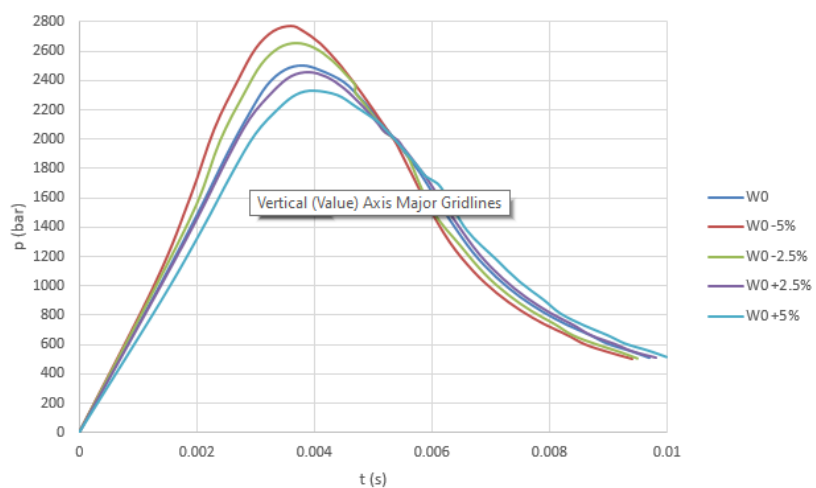
Дијаграм 5. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 6. Зависност брзине од времена



Дијаграм 7. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 8. Зависност притиска од времена

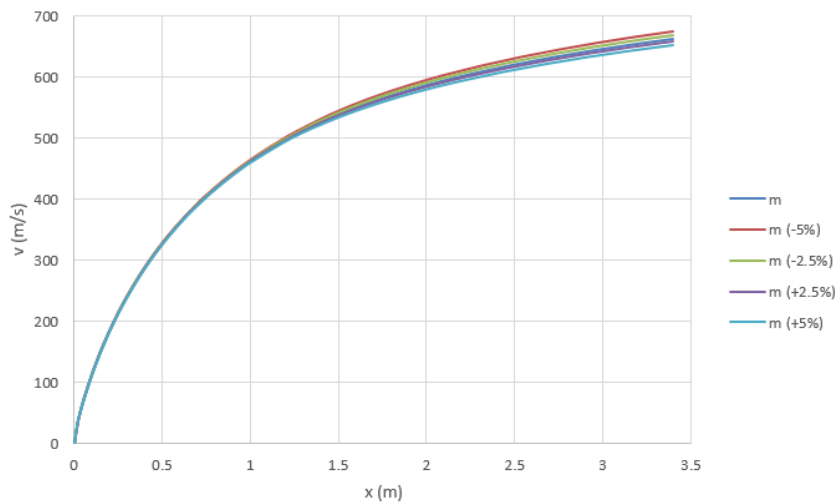
Табела 9: Битне вредности варирања

Вредност W_0 [m^3]	Промена у %	p_{max} [bar]	Промена у %	v_0 [m/s]	Промена у %
0.00687	0	2502	/	663	/
0.00644	-5%	2767	+10.6	676	+ 2
0.00661	-2.5%	2655	+6.5	671	+ 1.2
0.00695	+2.5%	2459	- 1.7	660	- 0.5
0.00721	5%	2331	- 6.8	653	- 1.5

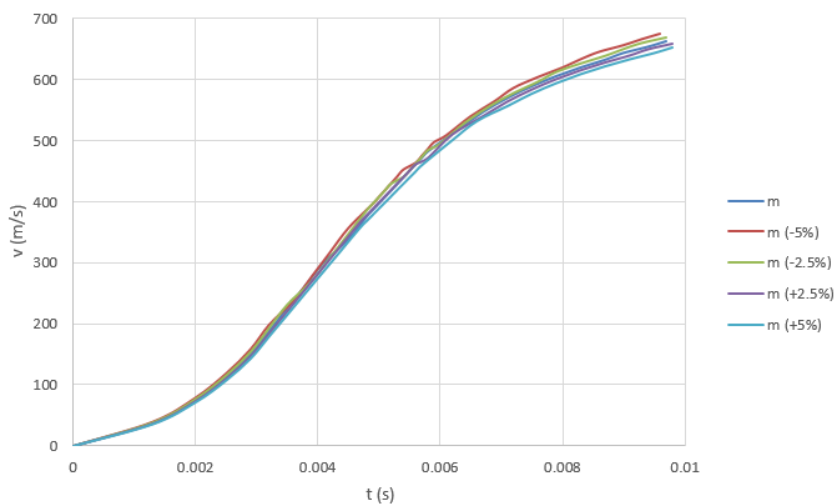
Из приказаних резултата се закључује да се смањењем запремине барутне коморе повећавају и максимални притисак и почетна брзина пројектила, и обрнуто.

5.2. Варирање масе пројектила

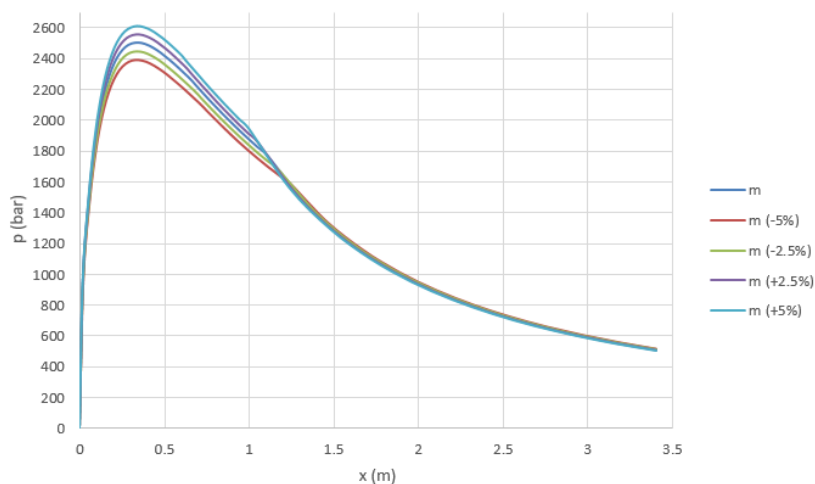
Маса пројектила (m) је други варирани параметар, варирана је у опсегу $\pm 5\%$ (инкремент 2.5%). Добијени резултати су приказани на следећим дијаграмима и табели:



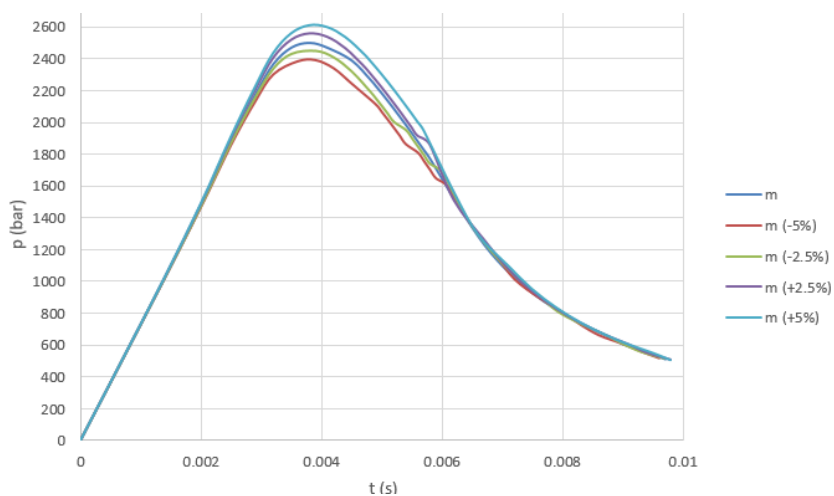
Дијаграм 9. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 10. Зависност брзине од времена



Дијаграм 11. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 12. Зависност притиска од времена

Табела 10: Битне вредности варирања

Вредност m [kg]	Промена y %	$p_{\max}$ [bar]	Промена y %	v_0 [m/s]	Промена y %
21.76	0	2502	/	663	/
20.67	-5%	2387	- 4.6	674	+ 1.7
21.22	-2.5%	2446	- 2.2	668	+ 0.8
22.3	+2.5%	2557	+ 2.2	658	- 0.8
22.85	+5%	2611	+ 4.4	652	- 1.7

Из приказаних резултата се закључује да се смањењем масе пројектила смањује максимални притисак, а почетна брзина пројектила се повећава. Повећањем масе пројектила повећава се максимални притисак, а смањује се почетна брзина пројектила.

5.3. Варирање дужине водишта пројектила

Дужина водишта пројектила (X_u), варирана је у опсегу $\pm 10\%$ (3 корака – инкремент 10%) и добијени резултати су приказани у следећој табели (није било потребе за графичким приказивањем, зато што се криве готово поклапају, $p_{\max}$ је у свим случајевима једнак).

Табела 11: Битне вредности варирања

Вредност X_u [m]	Промена у %	$p_{\max}$ [bar]	Промена у %	v_0 [m/s]	Промена у %
3.4	0	2502	/	663	/
3.06	- 10%	2502	/	649	- 2.1 %
3.74	+ 10%	2502	/	675	+ 1.8 %

Из приказаних резултата закључује се да се смањењем дужине водишта пројектила смањује и почетна брзина пројектила (и обрнуто). Максимални притисак у цеви остаје идентичан.

5.4. Варирање масе барута (обе врсте барута)

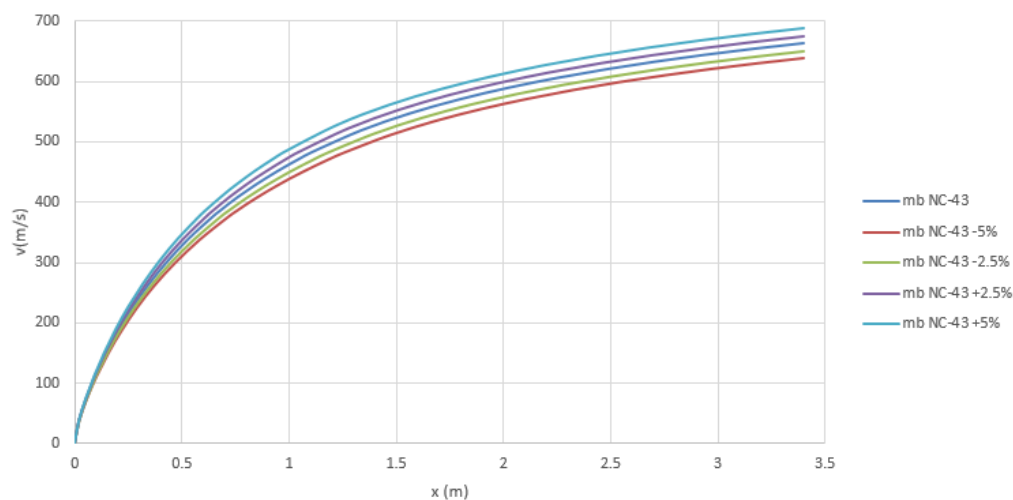
Како маса барута НЦ-122 чини мали део укупне масе барута, промене су занемарљиве (из тог разлога је маса варирана у опсегу $\pm 10\%$), и биће приказане само табеларно.

Табела 13: Битне вредности варирања

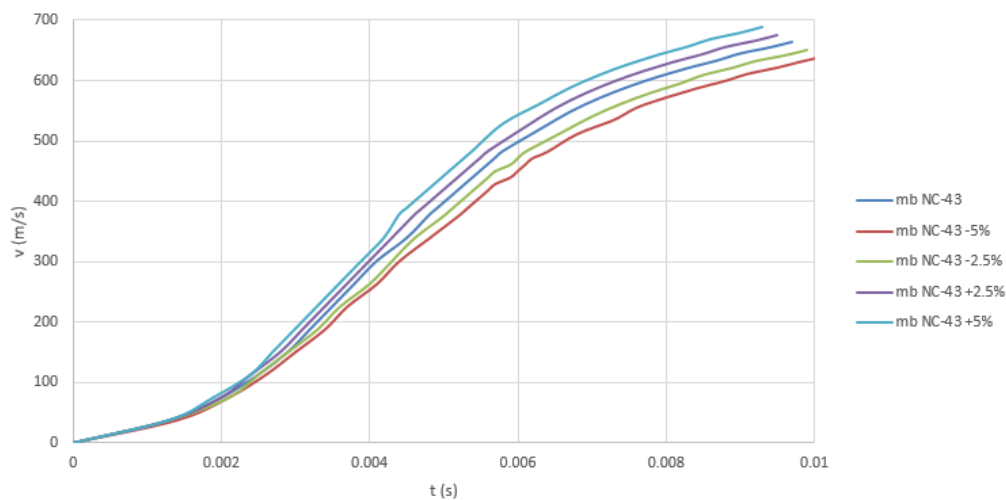
Вредност m_b [kg]	Промена у %	$p_{\max}$ [bar]	Промена у %	v_0 [m/s]	Промена у %
0.2	0	2502	/	663	/
0.18	- 10%	2466	- 1.4	660	- 0.5
0.19	- 5%	2484	- 0.7	661	- 0.3
0.21	+ 5%	2521	+ 0.8	665	+ 0.3
0.22	+ 10%	2539	+ 1.5	666	+ 0.5

Анализом резултата се потврђује претходно мишљење. Повећањем масе ове врсте барута, повећавају се максимални притисак и почетна брзина пројектила (и обрнуто), али су те промене занемарљиве.

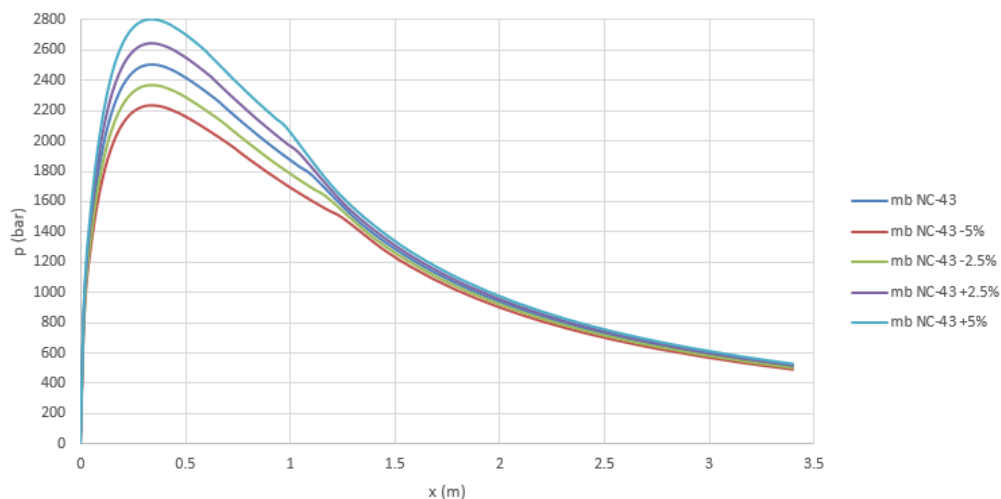
Маса барута (m_b) НЦ-43 варирана је у опсегу $\pm 5\%$ (инкремент 2.5%) и добијени резултати су приказани на следећим дијаграмима и табели:



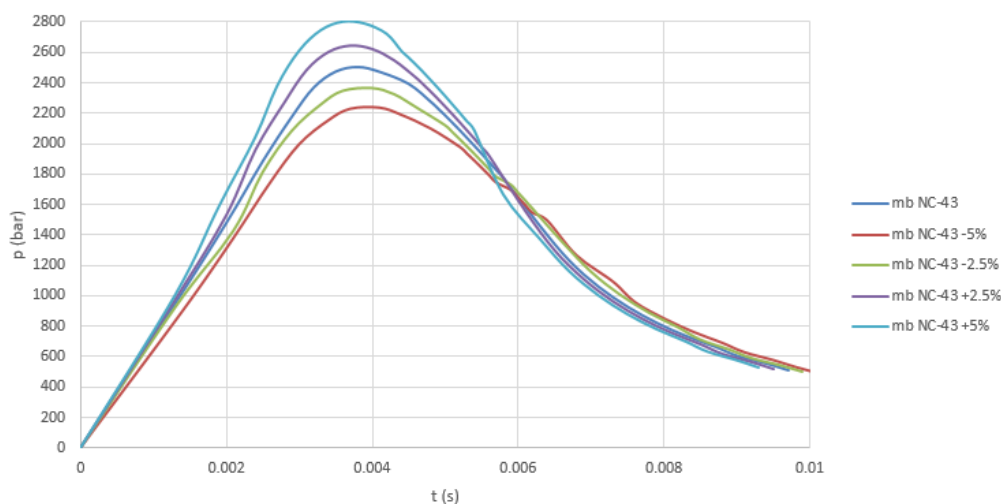
Дијаграм 13. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 14. Зависност брзине од времена



Дијаграм 15. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 16. Зависност притиска од времена

Табела 12: Битне вредности варирања

Вредност m_b [kg]	Промена у %	$p_{\max}$ [bar]	Промена у %	v_0 [m/s]	Промена у %
3.6	0	2502	/	663	/
3.42	- 5%	2232	- 10.8	639	- 3.6
3.51	- 2.5%	2364	- 5.5	651	- 1.8
3.69	+ 2.5%	2646	+ 5.8	675	+ 1.8
3.78	+ 5%	2797	+ 11.8	688	+ 3.8

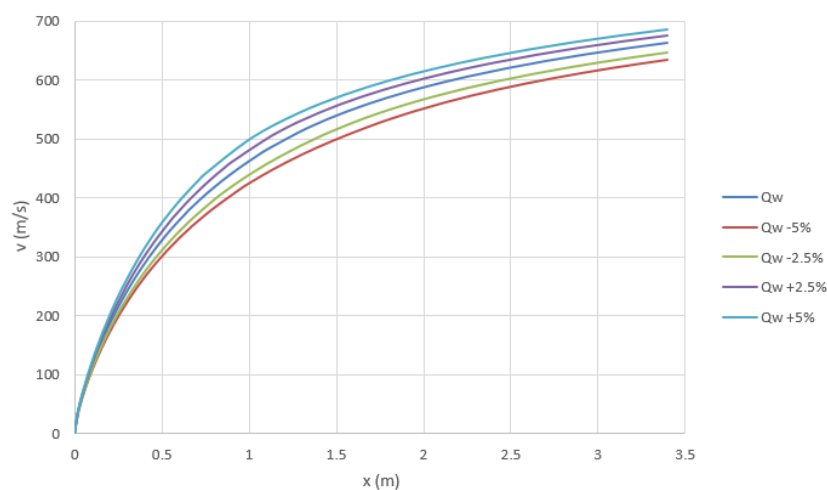
Анализом резултата примећује се да се повећањем масе барута НЦ-43 повећавају и максимални притисак и почетна брзина пројектила. Смањењем масе овог барута, смањује се максимални притисак, али и почетна брзина пројектила.

5.5. Варирање карактеристика барута

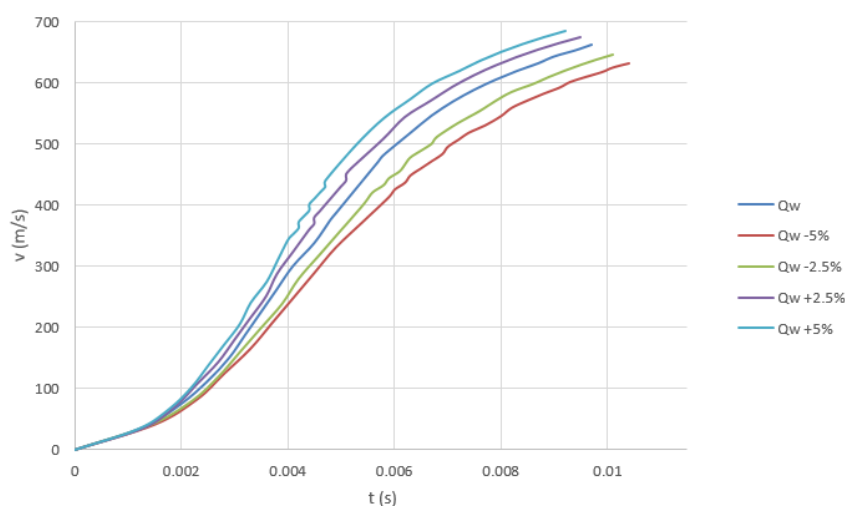
Варирањем Q_w , варирају се три компоненте на које Q_w утиче (специфичан рад б.г., коволумен б.г. и јединична брзина сагоревања), и које представљају полазне параметре за прорачун.

Q_w је варирано само за барут НЦ-43, који је већинска компонента укупног барута. Варирање Q_w за барут НЦ-122 није извршено, зато што су промене јако мале (због мале масе барута), и немају запажен утицај на притисак и почетну брзину.

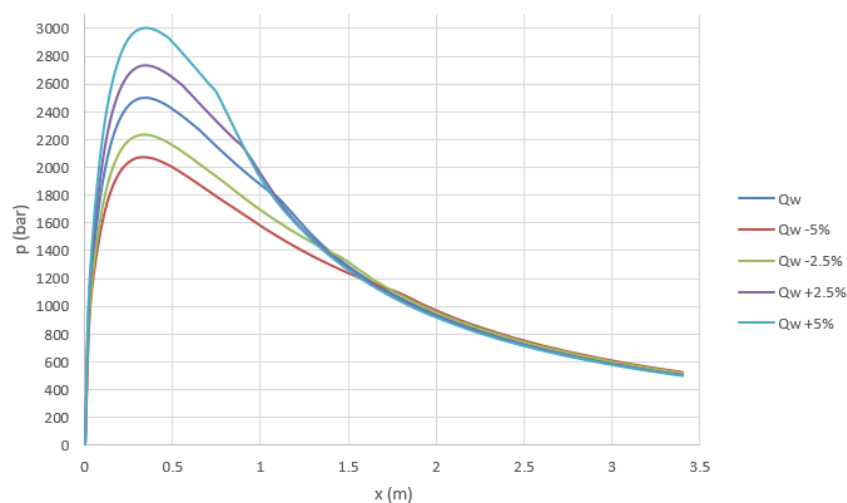
Резултати варирања Q_w и компоненти су приказани на следећим дијаграмима и табели:



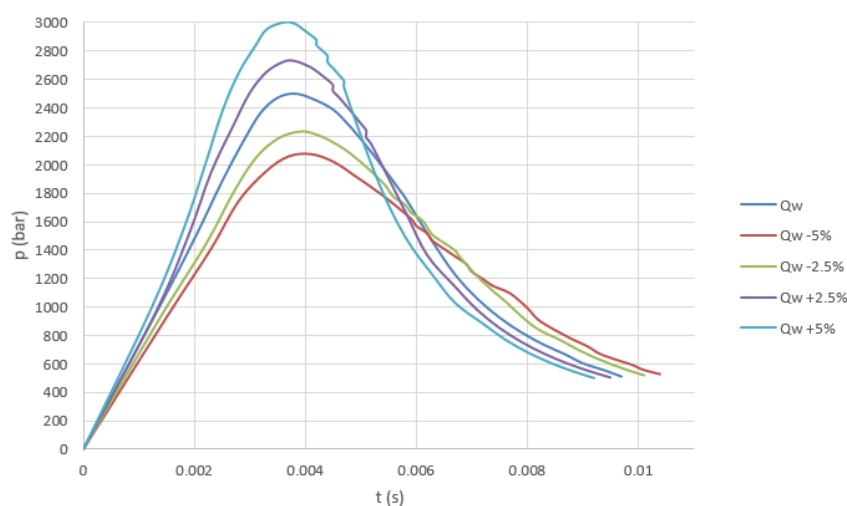
Дијаграм 17. Зависност брзине од пређеног пута



Дијаграм 18. Зависност брзине од времена



Дијаграм 19. Зависност притиска од пређеног пута



Дијаграм 20. Зависност притиска од времена

Табела 14: Битне вредности варирања

Вредност Q_w	Промена у %	f_b [m^3/kg]	α [m^3/kg]	u_{z0} [m/sPa]	p_{max} [bar]	Промена у %	v_0 [m/s]	Промена у %
3345	/	958391	0.000988	$8.329 \cdot 10^{-10}$	2502	/	663	/
3177	- 5%	942763	0.001011	$7.526 \cdot 10^{-10}$	2076	- 17	633	- 4.5
3246	- 2.5%	949036	0.001001	$7.855 \cdot 10^{-10}$	2235	- 10.7	646	- 2.6
3428	+ 2.5%	965581	0.000976	$8.725 \cdot 10^{-10}$	2735	+ 9.3	675	+ 1.8
3512	+ 5%	973217	0.000964	$9.127 \cdot 10^{-10}$	3000	+ 19.9	686	+ 3.5

Из приложених резултата се може закључити да повећањем Q_w , повећавају се и максимални притисак и почетна брзина пројектила, и обрнуто.

5.6. Закључци варирања

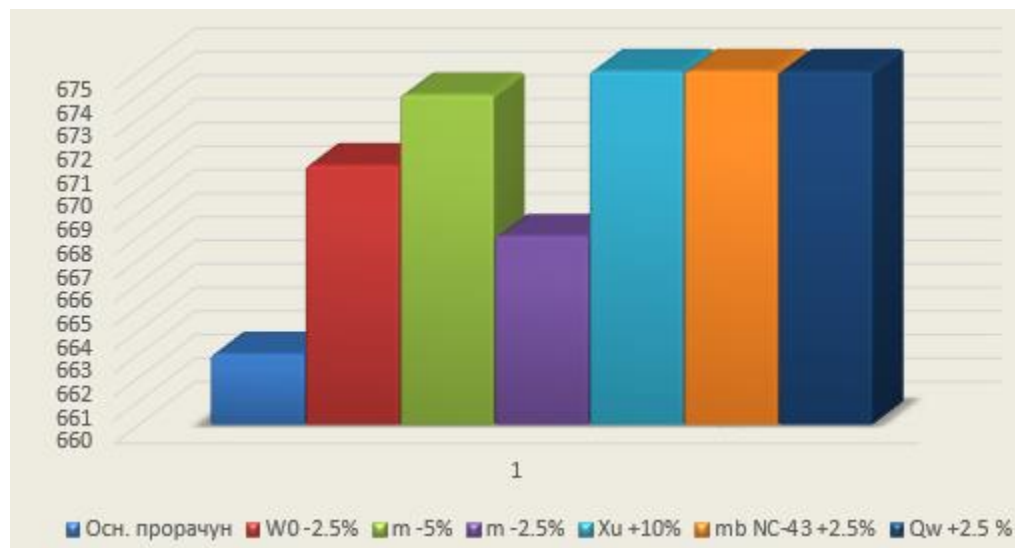
Граница за максимални притисак је постављена на 2750 бара. Односно, максимално повећање притиска у односу на основни прорачун може бити у границама до $\approx 10\%$. Тако да сва варирања у којима максимални притисак прелази дату вредност не могу бити оптималнија, зато што већи притисак изискује веће напрезање цеви што може довести до низа проблема. Такође, сва варирања код којих је почетна брзина мања од основног прорачуна не могу бити оптималнија, без обзира на смањење максималног притиска.

У следећој табели дат је преглед свих оптималнијих решења.

Табела 15: Сва оптималнија решења

	Основни прорачун	W_0 - 2.5 %	m - 5 %	m - 2.5%	X_u + 10%	mb NC-43 + 2.5%	Q_w + 2.5%
$p_{\max}$ [bar]	2502	2655	2387	2446	2502	2646	2735
v_0 [m/s]	663	671	674	668	675	675	675

На следећем дијаграму су вредности почетне брзине код оптималнијих варирања.



Дијаграм 21. Вредности почетне брзине оптималнијих решења

Из дате табеле и са дијаграма се види да су највећа повећања почетне брзине постижу повећањем X_u за 10%, повећањем mb NC-43 за 2.5%, повећањем Q_w за 2.5% као и смањењем m за 5%.

Као два оптимална решења аутор овог мастер рада бира смањење m за 5%, зато што се почетна брзина повећала за 1.7%, а максимални притисак се смањио за 4.6%, и повећање X_u за 10%, зато што максимални притисак остаје непромењен, а брзина се повећава за 1.8%.

Задатак овог мастер рада било је варирање једног параметра, а да сви други остану исти. Самим тим, закључак је да је могуће добити још оптималнија решења варирањем више параметара истовремено.

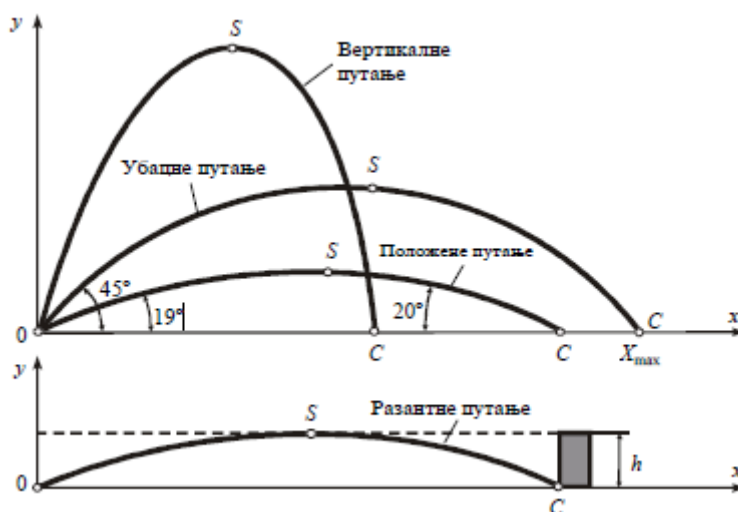
6. Елементи лета пројектила

6.1. Теоријске поставке

6.1.1. Облици путање лета пројектила

Према облику, путање разликујемо на:

- Положене путање (почетни угао $\theta_0 = 15-19^\circ$, а падни угао $\theta_C \approx 20^\circ$),
- Убацне путање (почетни угао $\theta_0 \leq 45^\circ$, а падни угао $\theta_C \geq 45^\circ$),
- Вертикалне путање (почетни угао $> 45^\circ$) и
- Разантне путање (почетни угао $\leq 5^\circ$, а теме путање се не издиже изнад циља).



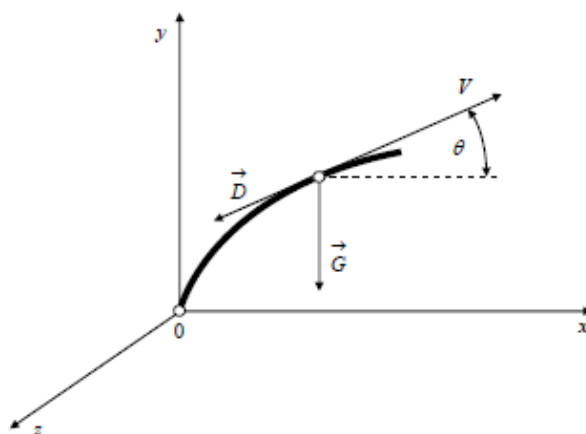
Слика 9. Облици путања пројектила [3]

Из претходно наведеног, јасно је да пројектил испаљен из хаубице Д30-Ј, као и пројектили из већине свих хаубица, има убацну путању.

6.1.2. Карактеристике лета пројектила у ваздушном простору - Ојлеров балистички модел

Леонард Ојлер, швајцарски научник, поставио је класични балистички модел путање, дефинисан следећим претпоставкама:

1. Пројектил се разматра као материјална тачка;
2. Координатни систем је везан за земљу која је равна и непокретна;
3. На пројектил делују тежина G и сила отпора ваздуха D , чији се правац поклапа са тангентом на путању (вектором брзине), а смер је супротан смеру брзине;
4. Пројектил се креће у статички и термодинамички стабилној атмосфери (без ветра и са стандардним променама параметара);
5. Пројектил излази из уста цеви почетном брзином V_0 , под полазним углом θ_0 , а координатни почетак је на устима цеви.



Слика 10. Ојлеров балистички модел [3]

Диференцијалне једначине кретања за класичне пројектиле

Векторска једначина кретања пројектила:

$$m\vec{a} = \Sigma \vec{F} \quad (6.1.2.1)$$

За Ојлеров модел биће:

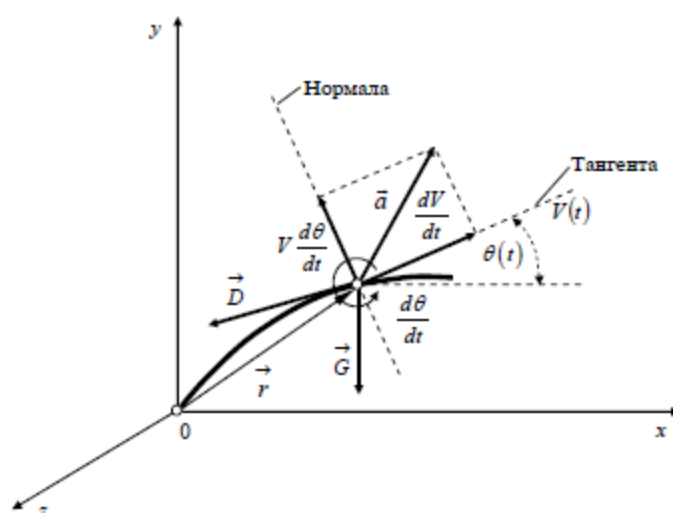
$$m\vec{a} = \vec{D} + \vec{G} \quad (6.1.2.2)$$

а после дељења са масом пројектила (скалар m):

$$\vec{a} = \vec{J} + \vec{g} \quad (6.1.2.3)$$

Ова векторска једначина се пројектује на тангенту и на нормалу путање. Вектор $\vec{a}$ сада има две компоненте (a_T и a_N). Дуж тангенте компонента убрзања је $a_T = \frac{dV}{dt}$, а друга компонента је дуж нормале на путању $a_N = \frac{d\theta}{dt}$.

Убрзање a_N , које је производ угаоне брзине $\frac{d\theta}{dt}$ и вектора V , има смер на ону страну где ротира вектор брзине при ротацији угаоном брзоном $V \frac{d\theta}{dt}$, што се може видети на следећој слици.



Слика 11. Компоненте убрзања [3]

Успорење ($-J$) је на тангенти, негативног предзнака, јер има супротан смер од тангенте орјентисане у смеру кретања. Убрзање Земљине теже $g(0, -g)$ има компоненте $-g \sin \theta$ дуж тангенте и $-g \cos \theta$ дуж нормале (предзнак „-“ је због супротног смера у односу на усвојене позитивне смерове нормале и тангенте).

Пројекције векторске једначине убрзања $\vec{a} = \vec{J} + \vec{g}$ на правац тангенте: $a_T = \frac{dV}{dt} = -J - g \sin \theta$ и нормале: $a_N = V \frac{d\theta}{dt} = -g \cos \theta$.

Брзина представља извод вектора положаја $\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{V}$. Када се пројектује на осе $0x$ и $0y$ добијају се компоненте брзине:

$$V_x(t) = V \cos \theta$$

$$V_y(t) = V \sin \theta.$$

Из једначине по a_T добија се брзина $V(t)$, а из једначине по a_N добија се $\theta(t)$.

Уз диференцијалне једначине иду и следећи почетни услови:

за $t = 0$; $x = 0$; $y = 0$; $v = V_0$; $\theta = \theta_0$

или $\dot{x}_0 = V_0 \cos \theta_0$ и $\dot{y}_0 = V_0 \sin \theta_0$.

6.2. Прорачун аеродинамичких коефицијена датог пројектила

За пројектил 122 mm ТФ 462 и вредностима аеродинамичких коефицијената датих у следећим табелама, извршени су прорачуни елемената путање у карактеристичним тачкама на путањи по Ојлеровом балистичком моделу, са програмским решењем OJL3SSK.

Динамичке карактеристике пројектила 122 mm, потребне за даљи прорачун, а добијене применом CAD алата, приказане су у следећој табели.

Табела 16: Динамичке карактеристике пројектила 122 mm

Карактеристика	Ознака	Вредности	Јединица
Калибар (реф. пречник)	d	122	mm
Маса пројектила	m	21.76	kg
Положај центра масе од врха	x_{cm}	21.25	cm
Уздужни момент инерције	I_{xx}	0.4621	kg · m ²
Попречни момент инерције	I_{yy}	0.4419	kg · m ²

Одређивање аеродинамичких коефицијената датог пројектила биће реализовано једним прорачуном:

- прорачун АД коефицијента аксијалне силе за случај осносиметричног опструјавања програмским решењем ADK0.

Полазни подаци за прорачун АД коефицијента аксијалне силе су дати у следећој табели.

Табела 17: Полазни подаци за прорачун АД коефицијента

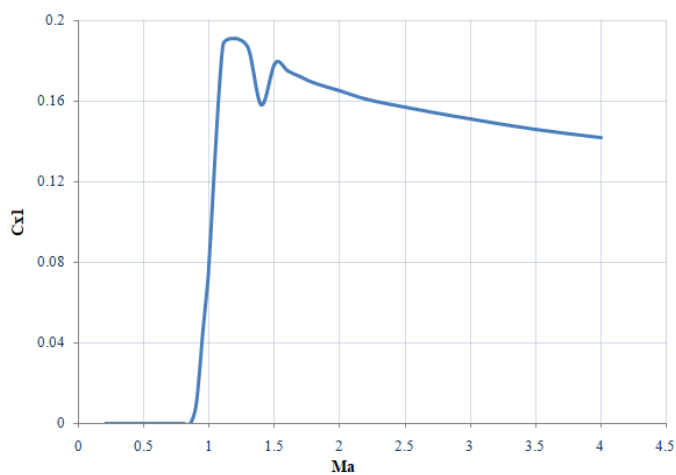
Улазни параметар	Ознака	Вредност	Јединица	Вредност у cal.
Калибар (реф. пречник)	d	122	mm	1
Дужина пројектила	l	568	mm	4.66
Дужина предњег дела	l_1	251	mm	2.06
Однос полупречника оживала	R_t/R	1	/	/
Дужина задњег конуса	l_3	82	mm	0.67
Пречник дна пројектила	d_d	100	mm	0.82
Пречник врха пројектила	d_m	20	mm	0.16
Пречник водећег прстена	d_4	124	mm	1.02
Положај центра масе од врха пројектила	x_{cm}	361.5	mm	2.96

Резултати прорачуна аеродинамичког коефицијента аксијалне силе при оносиметричном опструјавању АДК0 дати су у следећој табели.

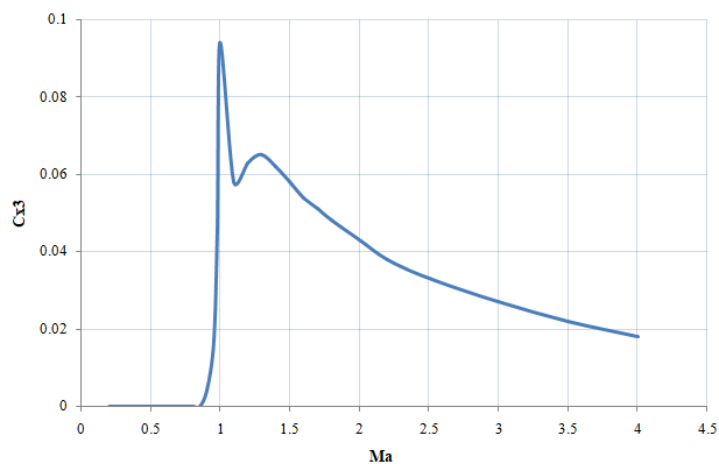
Табела 18: Резултати прорачуна

Махов број	АДК предњег дела	АДК задњег конуса	АДК водећег прстена	АДК трења	АДК дна	Укупан АДК аксијалне силе
Ma	C_{x1}	C_{x3}	C_{x4}	C_{xf}	C_{xd}	C_{x0}
0.2	0	0	0	0.06	0.058	0.118
0.5	0	0	0	0.051	0.065	0.116
0.6	0	0	0	0.049	0.069	0.118
0.7	0	0	0	0.047	0.072	0.12
0.8	0	0	0.001	0.046	0.076	0.124
0.85	0	0	0.002	0.045	0.078	0.126
0.9	0.009	0.004	0.004	0.045	0.08	0.143
0.95	0.047	0.017	0.008	0.044	0.082	0.198
0.975	0.064	0.046	0.01	0.044	0.083	0.247
1	0.079	0.094	0.01	0.043	0.112	0.339
1.1	0.188	0.058	0.009	0.042	0.111	0.409
1.2	0.191	0.063	0.008	0.041	0.11	0.414
1.3	0.186	0.065	0.008	0.040	0.108	0.407
1.4	0.158	0.062	0.007	0.039	0.107	0.373
1.5	0.179	0.058	0.007	0.038	0.105	0.386
1.6	0.175	0.054	0.006	0.037	0.102	0.375
1.7	0.172	0.051	0.006	0.037	0.1	0.365
1.8	0.169	0.048	0.006	0.036	0.097	0.356
2	0.165	0.043	0.006	0.034	0.092	0.339
2.2	0.161	0.038	0.005	0.033	0.086	0.323
2.5	0.157	0.033	0.005	0.031	0.077	0.303
3	0.151	0.027	0.005	0.028	0.063	0.273
3.5	0.146	0.022	0.005	0.025	0.052	0.250
4	0.142	0.018	0.005	0.023	0.043	0.231

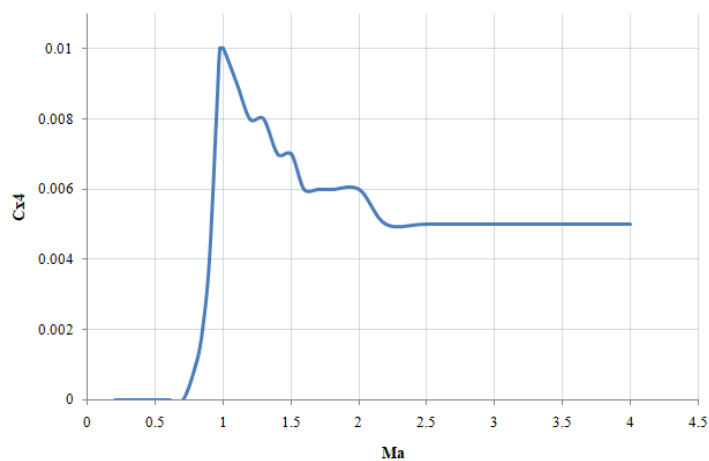
Резултати су такође приказани и на следећим дијаграмима, ради боље прегледности.



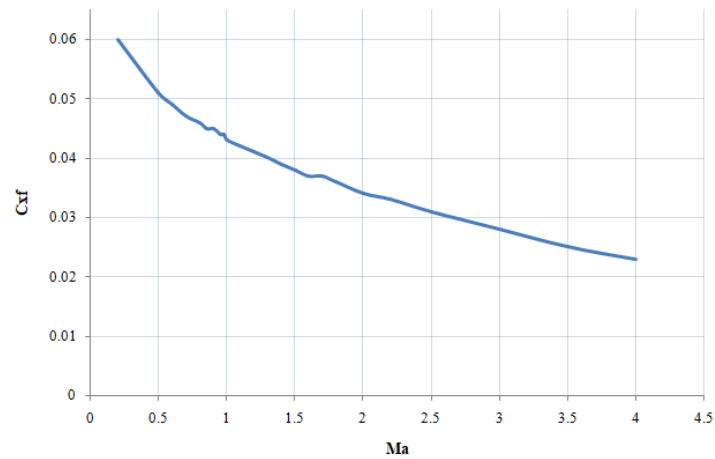
Дијаграм 22. Компонента АДК аксијалне силе предњег дела



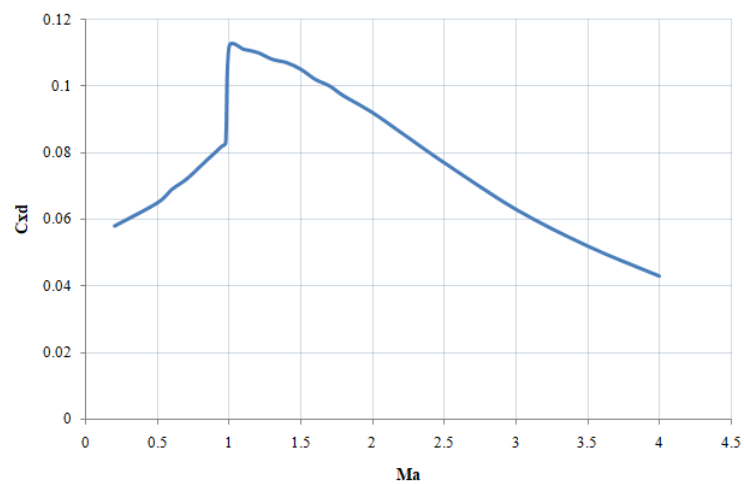
Дијаграм 23. Компонента АДК аксијалне силе задњег конуса



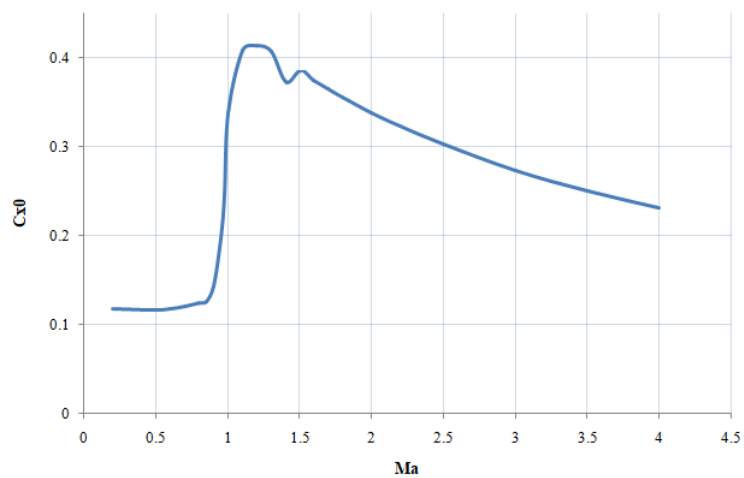
Дијаграм 24. Компонента АДК аксијалне силе водећег прстена



Дијаграм 25. Компонента АДК аксијалне силе отпора трења



Дијаграм 26. Компонента АДК аксијалне силе дна пројектила



Дијаграм 27. АДК аксијалне силе

6.3. Прорачун елемената путање са програмским решењем OJL3SSK

За дати пројектил извршен је прорачун елемената путање у карактеристичним тачкама на путањи по Ојлеровом балистичком моделу, са наведеним програмским решењем.

Подаци потребни за овај прорачун су АД коефицијенти аксијалне силе (силе отпора ваздуха), добијени претходним прорачуном и еталон функције коефицијента отпора ваздуха по Закону из 1943. СССР.

Балистички коефицијент се израчунава по следећем обрасцу:

$$C_{43} = \frac{i_{43} \cdot d^2}{m} 10^3 \quad (6.3.1)$$

У следећој табели су представљени улазни подаци за прорачун.

Табела 19: Улазни подаци за прорачун

Улазни параметар	Ознака	Вредност	Јединица мере
Висина падне тачке	YH	0	m
Балистички коефицијент	CS	0.6398 (0.67356)	/
Полазна вредност полазног угла	TET0	40	°
Прираштај вредности полазног угла	DTET	5	°
Крајња вредност полазног угла	TETK	50	°
Полазна вредност почетне брзине	VOP	663	m/s
Прираштај вредности почетне брзине	DVOP	0	m/s
Крајња вредност почетне брзине	VOK	663	m/s

Након прорачуна елемената путање у карактеристичним тачкама на путањи за почетну брзину и балистички коефицијент добијених за основни прорачун, извршени су и прорачуни за два најоптималнија решења одабрана након варирања параметара у претходном поглављу овог мастер рада.

Након појединачних варирања полазних података УБ прорачуна, као најоптималнија решења одабрана су смањење масе пројектила за 5% и повећање дужине цеви (дужине водишта пројектила) за 10%.

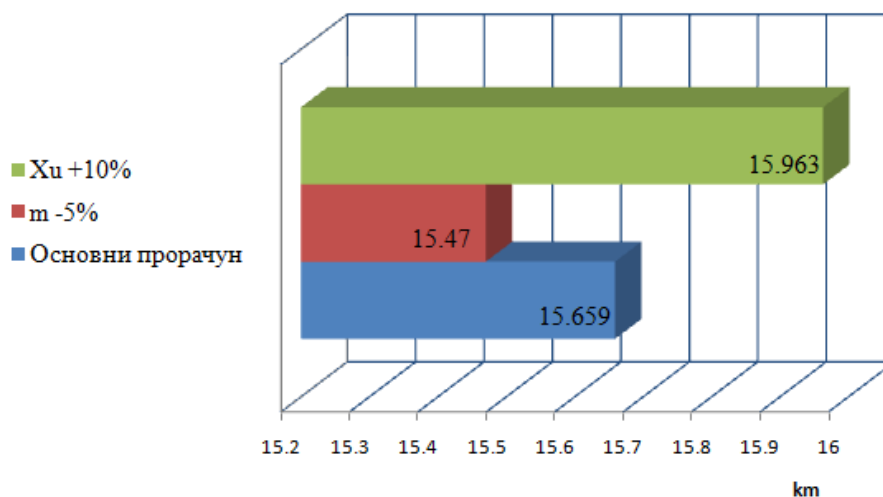
Како би се одредило које решење је најоптималније, извршени су СБ прорачуни. Извршени су прорачуни за основне податке (основа) и за оптималнија решења, и резултати су касније упоређени.

Резултати прорачуна елемената путање приказани су у следећој табели:

Табела 20: Резултати прорачуна елемената путање

	Почетна брзина	Балистички коэффициент	Полазни угао	Домет	Падни угао	Падна брзина	Време лета	Промена
	$V_0[m/s]$	$C_s[/math>$	$\theta_0[^\circ]$	$x_c[m]$	$\theta_c[^\circ]$	$V_c[m/s]$	$t_c[s]$	$[\%]$
Осн. под.	663	0.6398	40	15 478	-54.5	312	57.8	/
	663	0.6398	45	15 659	-58.6	318	63.3	/
	663	0.6398	50	15 477	-62.5	322	68.4	/
m - 5%	674	0.67356	40	15 301	-54.9	309	57.7	/
	674	0.67356	45	15 470	-59	315	63.1	-1.2
	674	0.67356	50	15 283	-62.8	320	68.2	/
Xu + 10%	675	0.6398	40	15 748	-54.7	313	58.5	/
	675	0.6398	45	15 936	-58.9	319	63.9	+1.8
	675	0.6398	50	15 755	-62.7	323	69.1	/

Ради бољег визуелног приказа, резултати дати у претходној табели (за почетни угао 45°) приказани су и на следећем дијаграму.



Дијаграм 28. Домет основног прорачуна и оптималних решења

7. Пројектовање и димензионисање цеви хаубице 122 mm

Једну важну етапу у процесу пројектовања цеви представља њено димензионисање. Остваривање довољне дебљине зида цеви тако да се при процесу опаљења ни у једном тренутку не прекорачи напон течења материјала јесте основни циљ димензионисања цеви. На основу типа цеви се прво врши успостављање релација за еластичну отпорност цеви, неком од теорија чврстоћа (четири најпознатије). Затим се креира крива прорачунског притиска, на основу притиска барутних гасова у цеви. Додавањем коефицијената сигурности у прорачун, добија се коначан изглед цеви који треба да обезбеди њену постојаност и издржљивост.

7.1. Теоријске поставке

7.1.1. Еластична отпорност моноблок цеви

Када се говори о еластичној отпорности цеви подразумева се максимални унутрашњи притисак (којим се цев може оптеретити под условом да не дође до трајних (пластичних) деформација. На основу тога се еластична отпорност може изразити као највећи гранични притисак који цев може да издржи и остане у подручју еластичних деформација.

И поред тога што су познате вредности максималних променљивих напрезања σ_t и σ_r по слојевима цеви оруђа при опаљењу, није једноставно утврдити и доказати преко којих вредности ових максимума може доћи до појаве трајних деформација. Другим речима, колика је еластична отпорност моноблок цеви. Експериментима је доказано да је за дефинисање тог граничног стања, поред интензитета главних напрезања, потребно познавати и њихове међусобне односе, поготово ако се узме у обзир сложено троосно стање напрезања цеви као и већи број могућих комбинација тих односа.

Због тога је неопходно да се сложено напрезање сведе на облик који се може упоређивати са одговарајућим напрезањем једноосно оптерећене епрувете. Код деформација таквог компаративног облика, разни аутори су полазили од различитих претпоставки и хипотеза. Одатле су се развиле различите теорије чврстоће или критеријуми чврстоће који се могу применити у методологији пројектовања цеви оруђа.

Неке од најпознатијих теорија чврстоће су:

1) **Критеријум највећих нормалних напрезања** (Galileo, Virgile и др.)

По овом критеријуму гранично стање напрезања, односно пластична деформација или лом материјала, наступа у случају када највеће по апсолутној вредности главно напрезање достигне вредност границе еластичности материјала.

2) **Критеријум највећих линеарних деформација** (Saint-Venant, Mariott)

Почетак пластичних деформација или лом материјала настаје када највећа по апсолутној вредности величина линеарне деформације достигне допуштену границу еластичне деформације.

3) **Критеријум највећих тангенцијалних напрезања** (Coulomb, Tresk)

По овом критеријуму чврстоће, пластичне деформације настају онда када највеће резултујуће смичуће напрезање у зиду цеви достигне величину дозвољеног граничног напрезања.

Прва теорија је применљива само за врло крте материјале, где је утицај других напрезања готово занемарљив. Експериментално је доказано да овај критеријум не изражава услове прелаза материјала у пластично подручје или његов лом. Други критеријум чврстоће цеви има широку примену при пројектовању цеви и даје знатно боље резултате од првог критеријума. Он је у дужем временском периоду био доминантан у прорачунима цеви у Немачкој, Русији и Чешкој. По трећој теорији чврстоће су се у дужем периоду прорачунавале цеви у Француској и САД-у, а затим све више и у другим земљама.

Сва три критеријума чврстоће спадају у групу такозваних „класичних“ теорија. Поред ових теорија постоји цео низ модерних теорија чврстоће, као што је теорија укупне потенцијалне енергије (Beltrami), по којој материјал прелази у стање пластичних деформација онда када укупна специфична енергија деформације достигне неку граничну вредност.

Од новијих теорија најчешће се примењује теорија потенцијалне енергије деформације, тј. енергије промене облика. Ова теорија позната је и као Hubert-Mises-Henki (ХМХ). С обзиром да се на основу ове теорије решавају алгоритми програмских решења базираних на методи коначних елемената, о овој теорији биће нешто више речи.

4) **Критеријум енергије промене облика** (НМН)

По овој теорији пластично стање настаје онда када потенцијална енергија промене облика јединичне запремине материјала у посматраној тачки пређе граничну вредност специфичне енергије деформације, каква је установљена за исти материјал при једноосном затезању епрувете до границе еластичности.

Ако важи Хуков закон, специфична енергија деформације може се изразити као збир специфичних енергија промене запремине тела и специфичне енергије промене облика тела.

Без детаљнијег извођења потребних релација, карактеристични израз за теорију ХМХ добија се у облику:

$$(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_t)^2 = 2\sigma_e^2 \quad (7.1.1.1)$$

Да се добије израз за еластичну отпорност моноблок цеви по критеријуму ХМХ, разматра се случај који је ближи пракси, а уједно једноставнији за прорачуне, када је $\sigma_z = 0$ и $\sigma_r = -p_1$.

На унутрашњој површини цеви за $r = r_1$ следи:

$$\sigma_{t1}^2 - \sigma_{t1}\sigma_{r1} = 2\sigma_e^2 \quad (7.1.1.2)$$

Уколико се у претходни израз уврсте изрази за σ_{t1} и σ_{r1} , после сређивања израза се добија релација за еластичну отпорност моноблок цеви по ХМХтеорији која гласи:

$$p_{1gr}^{IV} = \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{\sqrt{3a_{21}^4 + 1}} \quad (7.1.1.3)$$

Овај критеријум чврстоће је у потпуном складу са експерименталним резултатима, посебно за танкозидне цеви и сматра се потпунијим у односу на претходне, али су прорачуни на бази ове теорије опширнији. У последње време се овај критеријум заједно са критеријумом Сен Венана најчешће користи у пракси при дефинисању еластичне отпорности моноблок цеви.

7.1.2. Граница еластичне отпорности неојачане (моноблок) цеви

Границом еластичне отпорности моноблок цеви назива се онај максимални унутрашњи притисак p_1 при коме на унутрашњој површини канала цеви нема трајних деформација. За одређивање максималног притиска користе се изрази добијени по разним теоријама отпорности.

а) Прва теорија отпорности

Према првој теорији, трајне деформације у материјалу, подвргнутом запреминском напегнутом стању, настају када једно од главних напрезања достигне границу еластичности материјала при чистом истезању, тј. трајних деформација нема ако је:

$$\sigma_t \leq \sigma_e \text{ или } \sigma_r \leq \sigma_e.$$

По првој теорији граница еластичне отпорности цеви утолико је већа уколико су чвршћи материјал за цев и већа дебелина његових зидова. Максимална вредност границе еластичне отпорности за $r_2 \rightarrow \infty$ биће:

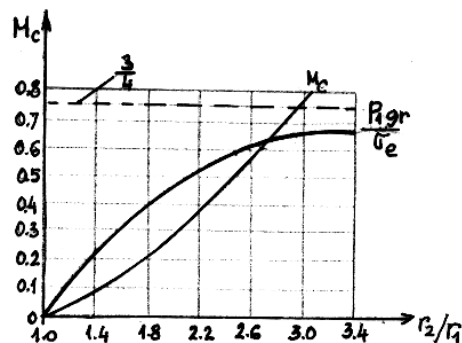
$$p_{1\max}^I = \sigma_e \quad (7.1.2.1)$$

Ова теорија не узима у обзир друга два главна напрезања σ_r и σ_χ .

б) Друга теорија отпорности

Према другој теорији трајне деформације у материјалу, подвргнутом запреминском напегнутом стању, настају када највеће релативно издужење буде једнако релативном издужењу по чистом истезању.

Из ове теорије се може закључити да бесконачно повећање дебелине зидова цеви не доводи до повећања границе еластичне отпорности неојачане цеви преко 3/4 границе еластичности материјала.



Слика 13. Дијаграм еластичне отпорности и масе цеви у зависности од дебелине зидова [4]

Са приказаног дијаграма се види да је за добијање оптималне масе цеви целисходно да однос r_2/r_1 буде у границама 2.2-2.5.

в) Трећа теорија отпорности

По трећој теорији отпорности, трајне деформације у материјалу, подвргнутом запреминском напрегнутом стању, настају када највећа тангенцијална напрезања, једнака полуразлици тангенцијалног и радијалног главног напрезања, буду једнака граници еластичности материјала при увијању, то јест:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_t - \sigma_r}{2} = \sigma_{eu} \quad (7.1.2.2)$$

Па је граница еластичне отпорности цеви, прорачуната по теорији највећих тангенцијалних напрезања, онај унутрашњи притисак p_1 при коме су максимална тангенцијална напрезања на унутрашњој површини једнака граници еластичности материјала при увијању.

Максимална вредност границе еластичне отпорности биће за $r_2 \rightarrow \infty$ па је:

$$p_{1\max}^{III} = \frac{\sigma_e}{2} \quad (7.1.2.3)$$

г) Четврта теорија отпорности

Према четвртој теорији, количина потенцијалне енергије коју прикупи јединица запремине материјала, доведеног до појаве трајних деформација, при сложене и простом напрегнутом стању је једнака тј. непостојање трајних деформација се одређује изразом:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_x)^2 + (\sigma_x - \sigma_t)^2} \leq \sigma_e \quad (7.1.2.4)$$

одакле произилази да се границом еластичне отпорности цеви, прорачунатом по четвртој теорији отпорности, назива онај унутрашњи притисак p_1 при коме енергија, коју добија јединица запремине материјала цеви, изазива напрезање једнако граници еластичности материјала.

Максимална вредност границе еластичне отпорности биће за $r_2 \rightarrow \infty$ па је:

$$p_{\max}^{IV} = \frac{\sigma_e}{\sqrt{3}} \quad (7.1.2.5)$$

7.1.3. Коефицијент сигурности цеви

Један од главних задатака при пројектовању и производњи цеви оруђа састоји се у томе да се обезбеди сигурна чврстоћа цеви. Цев мора бити отпорна при потпуном хабању, при било којој брзини гађања, при било ком режиму ватре, било којим температурним условима, када је недовољно очишћена и при свим дозвољеним одступањима у маси барутног пуњења пројектила.

При изради цеви мора се узети у обзир нехомогеност материјала цеви и знатне промене механичких особина метала под утицајем температуре. Зато дозвољена напрезања цеви морају бити мања од границе еластичности материјала, како при опаљењу не би дошло до појаве трајних деформација. Мора се предвидети одређена „резерва“ чврстоће цеви.

Повећање степена сигурности цеви се може постићи на два начина. Први начин је да се повећа дебљина зидова цеви, док је други начин повећање границе еластичности материјала. Први начин повећава масу цеви, а тако и масу оруђа, док други отежава производњу цеви.

Коефицијент сигурности цеви (n) представља однос границе еластичне отпорности цеви (p_{1gr}) и балистичког притиска (p_b):

$$n = \frac{p_{1gr}}{p_b} \quad (7.1.3.1)$$

Како је притисак барутних гасова у цеви променљива величина (мења се према кривој притиска), он није исти у сваком попречном пресеку цеви. Зато је дебљина зида цеви и резерва чврстоће различита у појединим попречним пресецима цеви, тј. сваки попречни пресек цеви има свој коефицијент сигурности.

За карактеристичне пресеке цеви се при прорачуну препоручују следеће минималне вредности коефицијента сигурности:

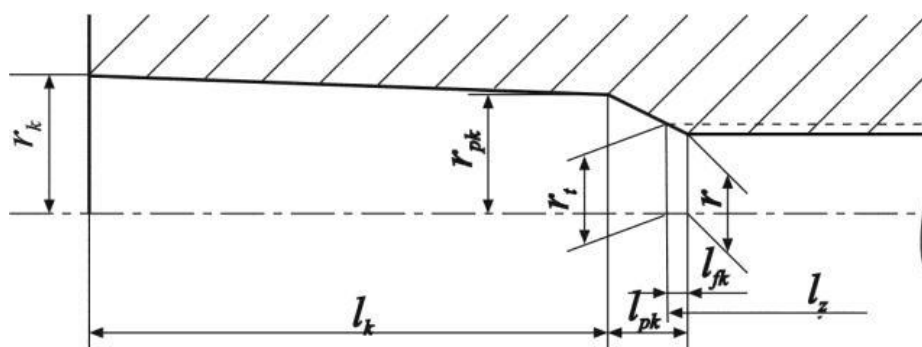
- за пресек у пределу барутне коморе $n_k = 0.8 \div 1$
- за пресеке од почетка жљебова до пресека где се постиже највећи притисак барутних гасова $n_{oz} \geq 1.2 \div 1.3$
- за пресеке у области уста цеви $n_u \geq 1.9$.

7.2. Методологија прорачуна моноблок цеви на чврстоћу

Поступак пројектовања моноблок цеви пореазумева тачно дефинисање унутрасње трасе цеви, тј. облик и димензије барутне коморе, водишта пројектила и спољне трасе цеви. При томе се мора водити рачуна да се максимално задовоље тактичко-технички захтеви за цев.

Изглед барутне коморе зависи од усвојене концепције, облика и конфигурације пројектила за дати калибар оруђа, а водиште пројектила зависи од начина вођења и стабилизације пројектила после лансирања из цеви оруђа.

За обликовање канала цеви полазни подаци су резултати УБ прорачуна. За барутну комору, ти подаци су W_0 , χ и l_k , док су за водиште пројектила d , l_z и l_u .



Слика 14. Изглед барутне коморе и пречазног конуса [4]

Важне ознаке:

W_0 - почетна запремина барутне коморе,

$\chi = \frac{l_0}{l_k}$ - коефицијент проширења барутне коморе,

$l_0 = \frac{W_0}{S}$ - сведена дужина барутне коморе,

$S = n_s \cdot d^2$ - површина попречног пресека канала цеви рачунајући и жљебове,

l_k - дужина барутне коморе,

l_z, l_u - дужина жљебљеног дела цеви, дужина пута пројектила у цеви,

l_{pk} - дужина прелазног конуса,

W_{pk} - запремина прелазног конуса: $W_{pk} = \frac{\pi}{3} l_{pk} (r_{pk}^2 + r_t^2 + r_{pk} r_t)$

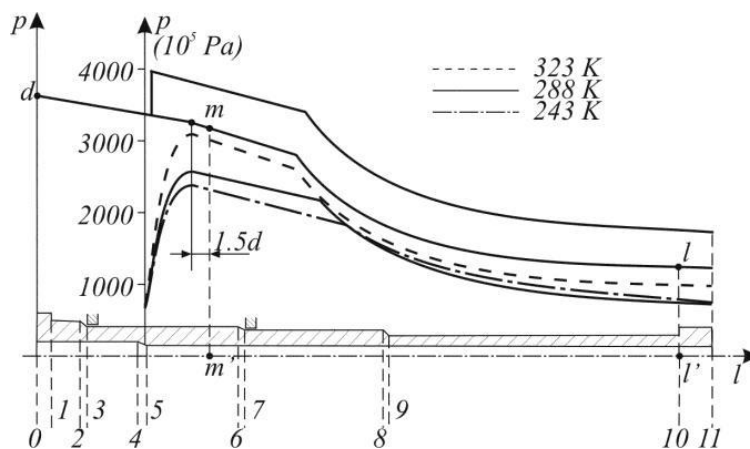
При дефинисању спољне трасе цеви (r_2) мора се узети у обзир и следеће:

- веза цеви и задњака
- веза цеви (задњака) и ПТУ
- начин хлађења цеви за брзометна оруђа
- конструкција колевке и избацивача барутних гасова (ејектора)
- други фактори који имају утицаја на димензије цеви.

Спољни пречник цеви се не сме нагло мењати због концентрације напрезања у смањења крутости цеви у појединим попречним пресецима. При димензионисању цеви треба узети у обзир све оно што се показало као корисно на до сада реализованим моделима оруђа код нас и у свету.

7.3. Поступак пројектовања и димензионисања моноблок цеви

У погодној размери се нацрта уздужни пресек цеви и одреди почетна позиција пројектила (слика 15).



Слика 15. Крива конструкционог притиска [4]

Преко УБ прорачуна одреде се криве промене притиска барутних гасова на дно пројектила $p(l)$ при температурама пуњења од 323 K, 288 K и 243 K и конструише крива највећег притиска. Ова крива пролази кроз тачке $p_m(323)$, $p_k(323)$, $p_k(288)$, $p_k(243)$, $p_u(323)$.

Одређује се крива „обвојница“ притиска барутних гасова на зидове цеви према:

- тачка $p_m(323)$ помера се за $1.5 d$ према устима цеви и добија се тачка m .
- Одређује се највећи притисак на дно коморе (дно чауре) p_{dm} и добија се тачка d према:

$$p_{dm} = p_{pm} \left(1 + \frac{m_b}{2m}\right), \quad (7.3.1)$$

где су:

p_{pm} - максимални притисак гасова на дно пројектила,

m_b - маса барутног пуњења,

m - маса пројектила.

Тачка m спаја се правом линијом до тачке d .

Одређује се притисак на зидове цеви од тачке m према устима цеви тако да је притисак на зидове цеви p_{st} једнак притиску на дно пројектила $p_{st} = p_p$. Од тачке m до уста цеви, тачка k , повлачи се континуирана крива притиска еквидистантна кривој највећег притиска.

Крива $dmlk$ представља криву обвојницу највећег притиска гасова на зидове цеви.

У даљем поступку одређује се крива пожељне отпорности цеви, односно крива конструкционог притиска.

Крива конструкционог притиска одређује се тако што се ординате криве највећег притиска помноже са коефицијентима сигурности чврстоће цеви n_i за поједине попречне пресеке и међусобно споје.

За пресек барутне коморе усваја се $n_k = 1$.

Од почетка ожлебљеног дела водича цеви до тачке m усваја се:

$n = 1.2$ за дубину жљеба $t = 0.01d$

$n = 1.3$ за дубину жљеба $t = 0.02d$

Помери се од уста цеви за дужину $2d$ (тачка l) и до краја пресека цеви усваја $n_u = 1.9$.

На делу цеви између тачака m и l , коефицијенат чврстоће се мења линеарно по закону:

$$n_i = 1.2 + 0.7 \frac{x_i}{m'l'} \quad \text{за дубину жљеба } t = 0.01d,$$

$$n_i = 1.3 + 0.6 \frac{x_i}{m'l'} \quad \text{за дубину жљеба } t = 0.02d,$$

где су:

x_i - растојање од тачке m до посматраног пресека и

$m'l'$ - разојање одсечка између m' и l' .

После дефинисања криве конструкционог притиска $p_k(l)$ дефинише се материјал за израду цеви. Ако је материјал за израду цеви познат (дата је величина границе еластичности материјала - σ_e), онда се из услова за гранични притисак по теорији највећих релативних тангенцијалних деформација на унутрашњем радијусу p_{igr}^{II} прорачунски одређују спољашњи полупречници цеви r_2 у појединим пресецима:

$$r_{2i} = r_{1i} \sqrt{\frac{3\sigma_e + 2p_{1k}}{3\sigma_e - 4p_{1k}}} \quad (7.3.2)$$

Добијене вредности за r_{2i} заокружују се до 5 mm на већу вредност. Прорачунати спољни пречник r_2 у пределу уста цеви (на делу дужине $2d$) треба повећати (5-6 mm), ако оруђе има гасну кочницу на устима цеви.

Ако материјал цеви није познат, онда се према услову за границу еластичне отпорности цеви одређује:

$$\sigma_e = \frac{2}{3} p_{bm} \frac{2a_{21}^2 + 1}{2a_{21}^2 - 1} \quad (7.3.3)$$

где су:

$$a_{21} = \frac{r_{2k}}{r_{1k}},$$

r_{1k} - највећи унутрашњи радијус барутне коморе и

p_{bm} - највећи балистички притисак.

Добијена вредност за σ_e заокружује се на стандардну вредност. При избору σ_e треба водити рачуна о томе шта прописују важећи стандарди за материјал цеви. Граница еластичности се може усвојити и на основу искуства са до сада оствареним конструкцијама оруђа, а затим се израчунава r_2 по релацији:

$$r_2 = r_{km} \sqrt{\frac{3\sigma_e + 2p_{bm}}{3\sigma_e - 4p_{bm}}} \quad (7.3.4)$$

где је:

r_{km} - највећи радијус барутне коморе.

Коначно дефинисање трасе цеви, којим су уважени захтеви у погледу вођења цеви за време трзања и враћања у клизачима колевке, затим повећање пречника на задњем пресеку због везе цеви са задњаком, додатак за везу цеви са гасном кочницом и сл., подразумева коначни облик спољне трасе цеви која је дефинисана стварним полупречницима r_{2sbr} .

На основу тога се коначно одређује стварна еластична отпорност моноблок цеви p_{1gr}^{I-IV} према усвојеној теорији чврстоће цеви, за сваки попречни пресек цеви где се мења спољни или унутрашњи радијус цеви. Стварни гранични притисак (еластична отпорност

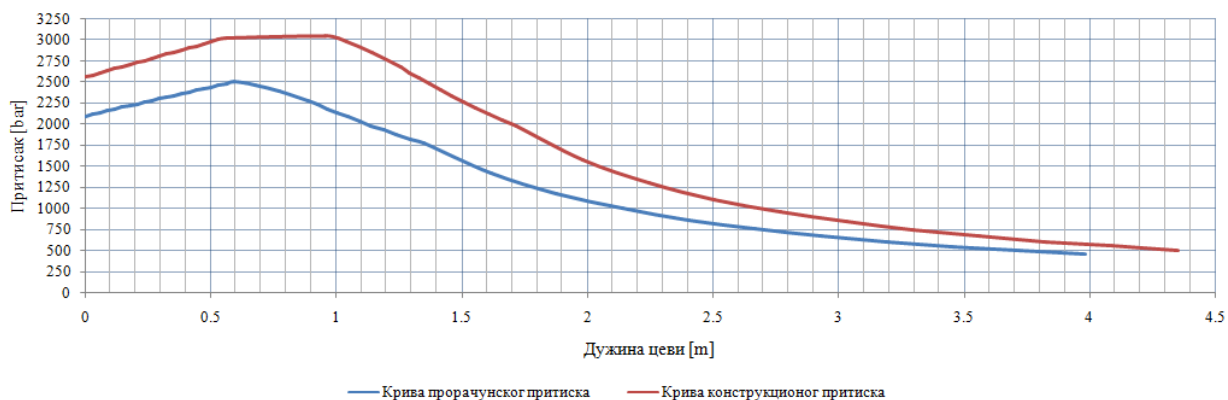
цеви) не сме бити мањи од очекиваног граничног притиска (или крива пожење отпорности цеви) p_{1k} .

Стварни коефицијент сигурности цеви у појединим пресецима одређује се као однос стварне еластичне отпорности p_{1gr}^{I-IV} и p_{bm} :

$$n_i = \frac{p_{1gr}^{I-IV}}{p_{bm}}. \quad (7.3.5)$$

За одабрано оптимално решење, извршено је димензионисање цеви у програмском језику „FORTRAN“. Развијен је код, ради поједностављења и упрошћења целог поступка димензионисања.

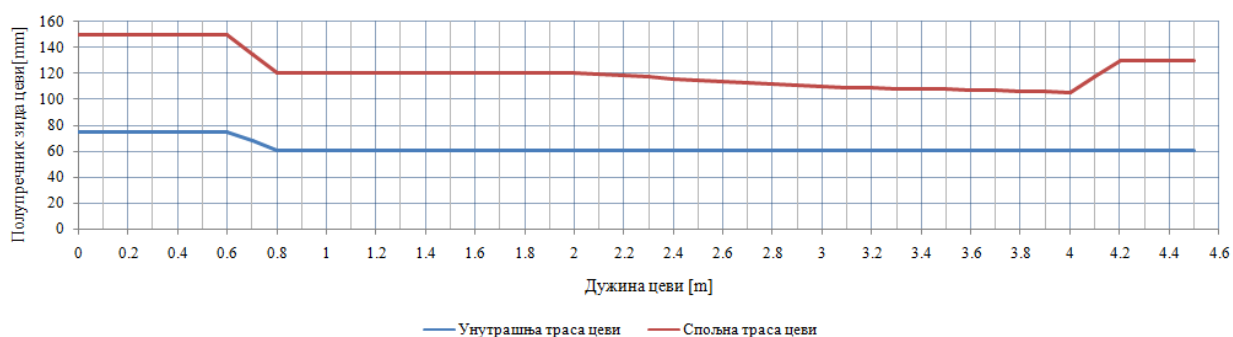
Резултат прорачуна који се односи на криве прорачунског и конструкционог притиска, приказан је на следећем дијаграму.



Дијаграм 29. Упоредни приказ кривих прорачунског и конструкционог притиска

Са претходног дијаграма се јасно може уочити да је конструкциони притисак дуж целе цеви већи од прорачунског притиска. Разлог су урачунати степени сигурности.

Резултати који се односе на облик (трасу) цеви, приказани су на следећем дијаграму (вредности су заокружене).

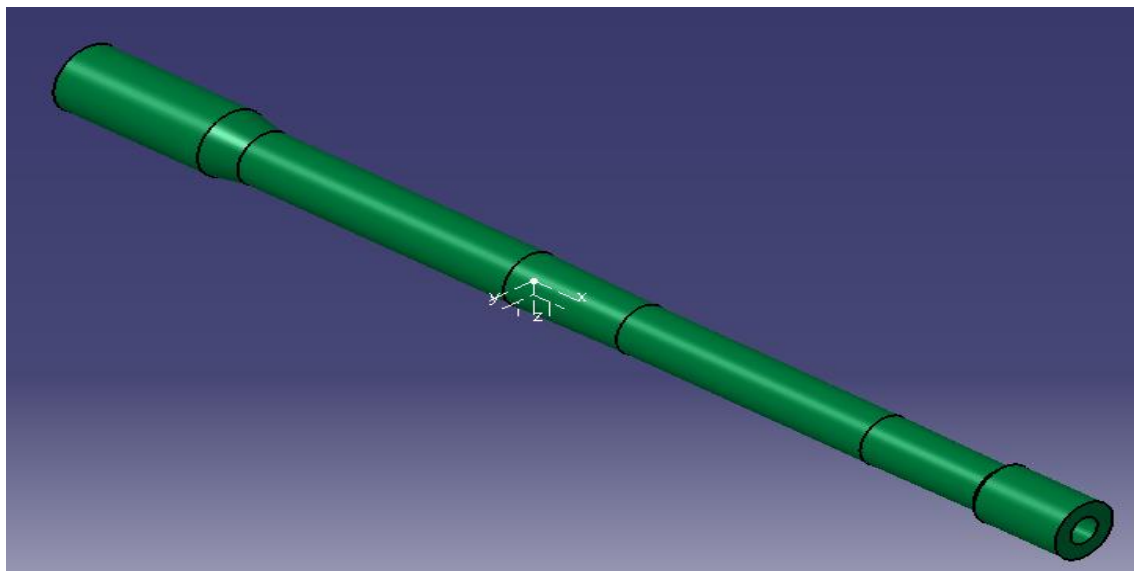


Дијаграм 30. Приказ контуре зида цеви

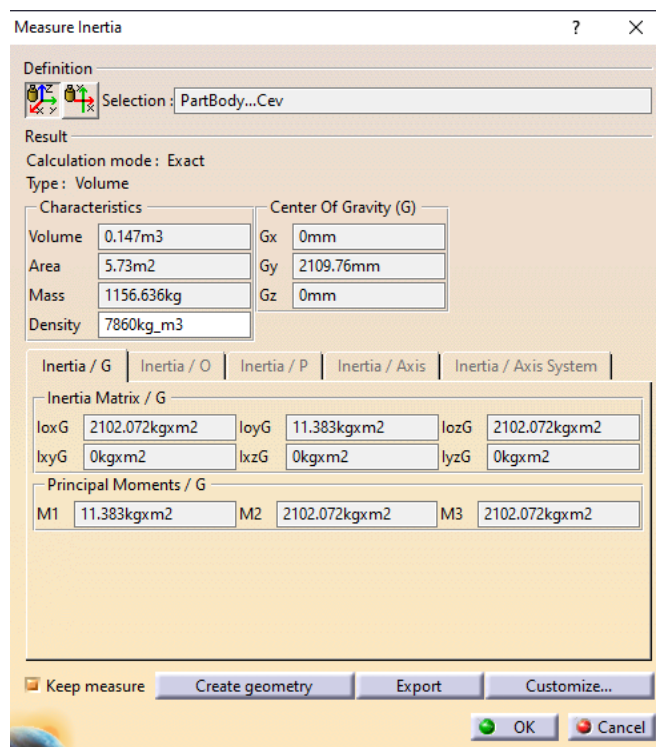
Унутрашња траса цеви је конструисана на основу улазних параметара, док је спољна траса цеви конструисана на основу криве конструктивног притиска (додати сви степени сугурности). Тако се на приказаном дијаграму јасно уочавају контуре зида цеви.

7.4. Израда 3Д модела цеви у САД софтверу

Након добијања података о контури цеви, израђен је 3Д модел. Модел је израђен у софтверу „САТИА“. На следећим сликама су приказане: слика цеви; подаци о маси цеви, моментима инерције и центру гравитације.



Слика 16. Изглед 3Д модела цеви



Слика 17. Подаци о маси, центру гравитације и моментима инерције

8. Анализа добијених резултата

Као таблична почетна брзина пројектила из хаубице Д-30Ј, користи се брзина од 690 m/s (од 680 до 720 m/s – зависно од врсте пројектила).

Почетна брзина добијена УБ прорачуном, методом Опокова, је 663 m/s, што је за око 3.8% мање од захтеване табличне почетне брзине, а за око 2.5% мање од доње границе табличне почетне брзине.

Узроци одступања могу бити у самом прорачуну (коду у програмском решењу), као и у неадекватним улазним подацима. Ту се првенствено односи на карактеристике барута, о којима најчешће нема потпуно тачних података, зато што се карактеристике барута разликују од групе до групе барута.

Одступање је у дозвољеним границама (<4%), па се почетна брзина добијена прорачуном користила као референтна за даље прорачуне и оптимизацију.

Оптимизацијом унутрашњебалистичких параметара, тежило се смањењу (ако је могуће) или што мањем повећању максималног притиска у цеви (основним прорачуном добијени притисак око 2500 бара), али и повећању почетне брзине пројектила. Добијени резултати и оптималнија решења, приказани су у следећој табели:

Табела 21: Сва оптималнија решења

	Основни прорачун	W_0 - 2.5 %	m - 5 %	m - 2.5%	X_u + 10%	mb NC-43 + 2.5%	Q_w + 2.5%
$p_{\max}$ [bar]	2502	2655	2387	2446	2502	2646	2735
v_0 [m/s]	663	671	674	668	675	675	675

Од наведених шест оптималнијих решења, одабрана су два најоптималнија:

- смањење масе пројектила за 5%, чиме је повећана почетна брзина за 11 m/s (око 1.7%), а максимални притисак у цеви оруђа смањен за 1.1 bar (око 4.6%) и
- повећање дужине водишта пројектила уа 10 %, чиме је почетна брзина повећана за 12 m/s (око 1.8%), а максимални притисак у цеви оруђа остао непромењен,

Спољнобалистичким прорачуном, односно, прорачуном елемената лета пројектила, добијени су следећи резултати:

Табела 22: Резултати прорачуна елемената путање

	Почетна брзина	Балистички коефицијент	Полазни угао	Домет	Падни угао	Падна брзина	Време лета	
	$V_0[m/s]$	$C_s[1]$	$\theta_0[^\circ]$	$x_c[m]$	$\theta_c[^\circ]$	$V_c[m/s]$	$t_c[s]$	$[\%]$
Осн. под.	663	0.6398	40	15 478	-54.5	312	57.8	/
	663	0.6398	45	15 659	-58.6	318	63.3	/
	663	0.6398	50	15 477	-62.5	322	68.4	/
m - 5%	674	0.67356	40	15 301	-54.9	309	57.7	/
	674	0.67356	45	15 470	-59	315	63.1	-1.2
	674	0.67356	50	15 283	-62.8	320	68.2	/
X _u + 10%	675	0.6398	40	15 748	-54.7	313	58.5	/
	675	0.6398	45	15 936	-58.9	319	63.9	+1.8
	675	0.6398	50	15 755	-62.7	323	69.1	/

- Смањење масе пројектила се позитивно одразило на вредност почетне брзине (повећање), и на вредност максималног притиска у цеви (смањење), али се негативно одразило на максимални домет (мањи је од домета добијеног прорачуном са почетним подацима за око 1.2% - за полазни угао 45°). Разлог овакве појаве је балистички коефицијент C_s . Промена масе пројектила у великој мери утиче на балистички коефицијент. Са смањењем масе пројектила, балистички коефицијент се повећава, што касније утиче на смањење крајњег домета.
- Повећање дужине водишта пројектила се позитивно одразило на вредност почетне брзине (повећање), док је максимални притисак у цеви остао непромењен. Такође, крајњи домет (за полазни угао 45°) се повећава за 1.8% од домета добијеног основним прорачуном. Није се десила појава као код смањења масе пројектила, из разлога што су ти подаци остали исти (маса пројектила, а самим тим и балистички коефицијент остали непромењени). Само је повећана почетна брзина у односу на основни прорачун, а самим тим сразмерно повећан и крајњи домет.

На основу изведених закључака, као најоптималније решење је одабрано повећање дужине водишта пројектила.

Израдом 3Д модела нове цеви, као и уношењем карактеристика материјала, могуће је извршити упоредну анализу постојеће (основне) и оптимизоване (нове) цеви.

Упоредна анализа је приказана у следећој табели:

Табела 23: Упоредна анализа постојеће и оптимизоване цеви

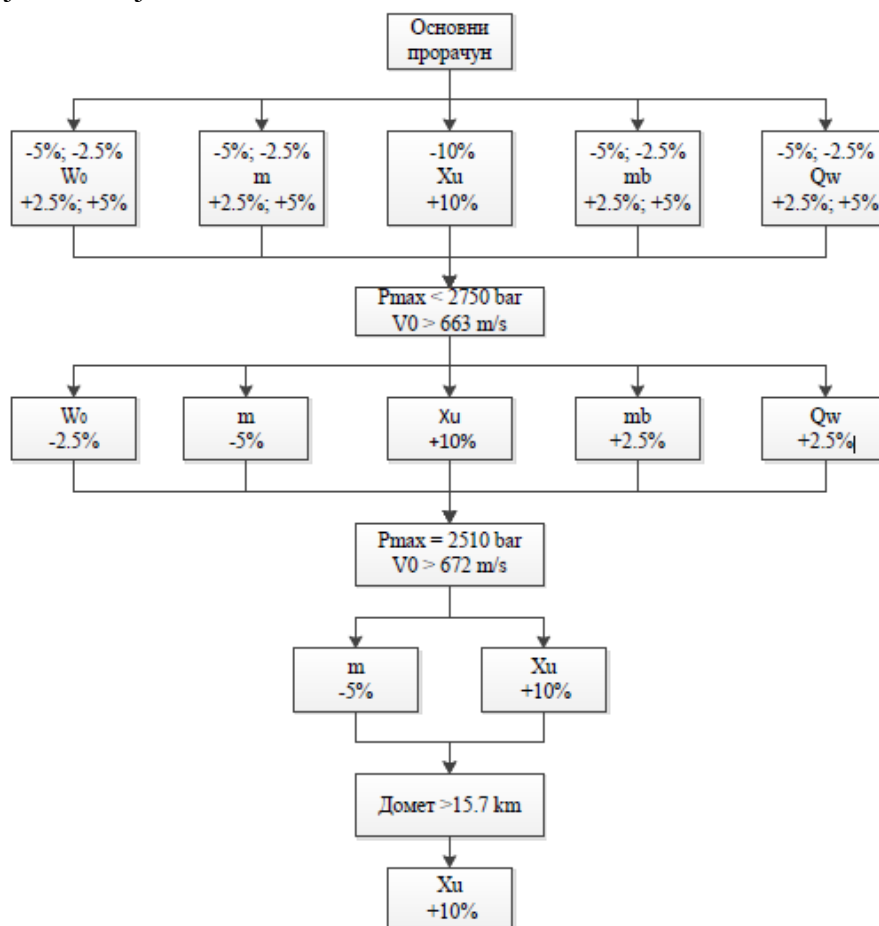
	Дужина цеви [m]	Маса цеви [kg]	Почетна брзина [m/s]	Домет [km]
Постојећа цев	4.27	1050	663	15.66
Оптимизована цев	4.6 (+7.5%)	1156 (+10.1)	675 (+1.8 %)	15.96 (1.8%)

Након одабира најоптималнијег решења, закључци су следећи:

- Повећањем дужине водишта пројектила за 10%, повећава се укупна дужина цеви за 7.5%.
- Ово повећање утиче позитивно на почетну брзину пројектила (већа за 1.8%), а самим тим сразмерно и на домет (+1.8%).
- Али негативно утиче на саму масу цеви (већа за 10.1%).

Као закључак ове оптимизације, може се поставити питање да ли је исплативо да за повећање домета од 1.8% (око 300 m) повећа маса цеви и целог система за 10.1% (око 105 kg).

Слободно мишљење и закључак аутора овог мастер рада је да систем јесте оптимизован, зато што додавањем око 100 kg, маса система се увећава за око 3% (пре 3350 kg, сада 3456 kg) , што на масу целог система нема великог утицаја. Али, проблеми су ти што се помера центар масе цеви напред, па самим тим и оса рамена лафета хаубице, што изазива низ других потребних модификација система. При том, дужа цев је и мање отпорнија на савијање.



Приказани алгоритам представља поступак добијања најоптималнијег решења.

9. Закључак

У оквиру овог мастер рада, и обраде теме пројектовања цеви хаубице 122 *mm*, извршени су различити таблични и аналитички унутрашњобалистички прорачуни, спољнобалистички прорачун елемената лета пројектила, као и прорачун димензионисања цеви.

Коришћена су програмска решења састављена у програмском језику „Fortran“, а обрађена кроз прорам „FORCE“, коришћени су и комерцијални софтвери за обраду података „EXCEL“, као и програми за 3Д моделирање „CATIA“.

Након упознавања читалаца са темом, кроз увод, и приближавања теми артиљеријског оруђа, са акцентом на хаубицу Д-30Ј, извршено је низ прорачуна, утврђеним редоследом, да би се као крајњи резултат добила нова (оптимизована) цев.

УБ пројектовање и прорачун цеви су изшени коришћењем одговарајућих израза таблично-аналитичке методе, методе Слухоцког, уз додатак таблица ГАУ [1]. Познати су били полазни подаци, тј. захтеви. Као излазни подаци, добијене су вредности почевши од почетне брзине, дужине цеви, запремине барутне коморе, максималног притиска б./г., масе барута, па све до укупног импулса у цеви.

Аналитичком методом, односно методом Опокова, извршен је УБ прорачун на основу унапред дефинисаних полазних података. Извршен је прорачун за већ постојеће средство. хаубицу Д-30Ј.

У циљу добијања оптималнијег решења од постојећег, варијани су одређени улазни подаци, по тачно утврђеним критеријумима. Након варирања, одабрана су два најоптималнија решења (смањење масе пројектила и повећање дужине водишта пројектила). Критеријуми за одабир оптималнијих решења након овог прорачуна, били су ти да се што више повећа оичетна брзина пројектила, уз што мање повећање максималног притиска у цеви (или смањење, ако је могуће). За два најоптималнија решења, добило се повећање почетне брзине у односу на полазно решење за 1.7-1.8%, док је максимални притисак у цеви остао идентчан, или је умањен.

Спољнобалистички прорачун је извршен ради одабира најоптималнијег решења. Критеријум за одабир је био крајњи домет пројектила, добијен прорачуном елемената путање лета пројектила (Ојлеров балистички модел). Након поређења домета са дометом постојећег средства, добијене су вредности домета више за 1.8% (код повећања дужине водишта пројектила) и ниже за 1.2% (код смањења масе пројектила). Анализа ових података је приказана у поглављу 8. овог мастер рада, а након добијања оваквих решења, као најоптималније решење је одабрано повећање дужине водишта пројектила за 10%.

За добијено оптимално решење, извршено је димензионисање цеви коришћењем критеријума енергије промене облика („Hubert-Mises-Henki“) како би се израчунала еластична отпорност цеви. Коришћењем улазних података и криве притиска добијене УБ прорачуном – методом Опокова, извршено је димензионисање у наведеном програмском решењу. При прорачуну су примењени коефицијенти сигурности како би се оставила

резерва у дебљини зида цеви за случај реалних одступања од математичког модела. Тиме је цев теоретски осигурана од пластичних деформација за те радне услове.

Димензионисањем цеви добијена је спољна и унутрашња траса цеви. Сходно томе је извршено моделирање цеви у програму „САТИА“. Увођењем карактеристика материјала, добијени су подаци коришћени за поређење нове цеви са постојећом.

У поглављу 8. извршена је комплетна компаративна анализа, упоређене карактеристике нове цеви са постојећом, и дати закључци и коментари везани за резултате.

Ради коректности метода прорачуна, у току пројектовања се морају вредности притиска, брзина и деформација експериментално одредити, што спада у фазу израде и провере прототипског модела. Тек на основу реално измерених вредности се могу донети коначни закључци о прихватању математичког модела.

10. Литература

- [1] Танчић, Љ. – „Унутрашњебалистичко пројектовање“, Медија центар Одбрана, 2014., Београд;
- [2] Цветковић, М. – „Унутрашња балистика“, Сектор за ШОНИД, ГШ ВЈ, 1998., Београд;
- [3] Регодић, Д. – „Спољна балистика“, Војна штампарија, 2006., Београд;
- [4] Ристић, З., Јаковљевић, М. – „Основи наоружања“, Војна академија, 2003. Београд;
- [5] Обрадовић, Л. – „Унутрашње балистичко пројектовање цеви топа 30 mm“, Мастер рад, Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу, 2020., Крагујевац
- [6] <http://www.military-today.com/>, приступљено: јун-септембар 2020.;
- [7] <http://www.hellenicaworld.com/Greece/Technology/en/CatapultTypes.html>, приступљено: јун 2020;
- [8] <https://www.mycity-military.com/Artiljerija-municija-i-protivoklopna-sredstva/HAUBICA-D30-122mm.html>, приступљено: јун 2020;
- [9] Техничко упутство, Хаубица Д-30Ј