

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



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Интеграција наоружања на мобилне платформе

Број индекса: 327/2019

Маријана Р. Сталевић

**Анализа оптерећења цеви 152 mm и
155 mm при опаљењу**

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Александар Кари, дипл. инж. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да:

Изврши анализу отпорности цеви калибра 152 и 155 mm при опаљењу и могућности прекалибрисања цеви 152 mm у цев калибра 155 mm. На основу предложене литературе и УБ прорачуна потребно је да постави модел оптерећења цеви оруђа. Затим је потребно да израчуна отпорност цеви на основу теорија ХМХ и Сен Венана. На самом крају неопходно је дати коментаре у смислу могућности прекалибрисања цеви 152 mm у цев калибра 155 mm.

Препоручена литература:

Зоран Ристић, Милисав Јаковљевић: *Основи наоружања*, Београд, 2003.

Александар Стаматовић: *Конструисање пројектила*, Београд, 1995.

Крагујевац, 25.09.2020.

Ментор:

др Александар Кари, ментор

Садржај

Увод	1
1. Хаубица као артиљеријско оруђе.....	3
1.1 Основне карактеристике хаубица	4
1.2 Основни склопови артиљеријског оруђа	4
1.3 Историјски развој пројекта НОРА	6
1.4 Опис топ - хаубице 152 mm M84 НОРА - А	8
1.5 Опис хаубице 155 mm НОРА Б - 52.....	11
1.6 Преглед страних решења хаубица 152 mm и 155 mm	13
1.6.1 Француска самоходна хаубица 155 mm Цезар.....	13
1.6.2 Јужноафричка самоходна хаубица 155 mm Г6	13
1.6.3 Кинеска самоходна хаубица 155 mm ПЛ345	14
1.6.4 Хаубица 155 mm ФХ - 70.....	14
1.6.5 Америчка хаубица 155 mm M198	15
1.6.6 Кинеска самоходна хаубица 152 mm Type 83	15
1.6.7 Руска самоходна хаубица 152 mm МСТА - С	16
1.6.8 Руска самоходна хаубица 2С3 Akatsiya 152 mm	16
2. Цев артиљеријског оруђа	18
2.1 Врсте цеви	18
2.2 Отпорност цеви	21
2.3 Еластична отпорност цеви.....	28
2.3.1 Критеријум највећих нормалних напрезања (Галилеј).....	29
2.3.2 Критеријум највећих линеарних деформација (Saint - Venant, Mariott)	29
2.3.3 Критеријум највећих тангенцијалних напрезања (Кулона и Треска)	31
2.3.4 Критеријум енергије промене облика (Hubert - Mises - Henki)	31
2.4 Коефицијент сигурности цеви.....	33
3. Прорачун отпорности цеви и анализа могућности конверзије цеви топ - хаубице 152 mm M84 НОРА - А у цев 155 mm	35
3.1 Анализа резултата прорачуна отпорности цеви топ – хаубице 152 mm M84 НОРА - А	36
3.2 Анализа могућности конверзије цеви	42
4. FEM анализа напонског стања зидова цеви.....	51
5. Закључак	55
ПРИЛОГ 1.....	57

ПРИЛОГ 2.....	64
Литература	70

РЕЗИМЕ

У оквиру мастер рада извршена је анализа напонског стања цеви 152 и 155 mm при опаљењу, као и могућност конверзије цеви калибра 152 mm у цев 155 mm. На почетку је дат опис хаубице као артиљеријског оруђа. Приказана су различита страна решења хаубица у калибру 152 и 155 mm. У даљем делу рада је описана цев артиљеријског оруђа и поступак прорачунавања њене отпорности. Прорачун отпорности цеви извршен је по теорији ХМХ и Сен Венана. На основу добијених резултата балистичког и граничног притиска прорачунат је степен сигурности цеви, који дефинише њену отпорност. Методом коначних елемената је извршена провера напонског стања зидова цеви и утврђено је да ли је напон који се јавља у зидовима цеви при опаљењу већи од максималног дозвољеног.

Кључне речи: *хаубица, цев, отпорност, притисак, напонско стање, коначни елемент.*

ABSTRACT

Within the master's thesis, the analysis of the stress state of 152 and 155 mm pipes during firing was performed, as well as the possibility of conversion of 152 mm caliber pipes into 155 mm pipes. At the beginning, there is a description of a howitzer as an artillery weapon. A presentation of different foreign solutions of howitzer (152mm and 155mm) is done. In the further part of the thesis, a description of the pipe as an artillery weapon, as well as the calculation procedure of the resistance, is shown. A calculation of the resistance of the pipe is done by Hubert - Mises - Henki and Saint Venant theory. On the basis of the obtained results (ballistic and border) a calculation of the security degree of the pipe, which defines its resistance, is done. By the method of finite elements, a check of the stress state of the pipe's walls is executed. On that basis, it's determined if the stress which shows up in the pipe's walls while firing is higher than the maximum allowed.

Key words: *howitzer, pipe, resistance, pressure, stress state, finite element.*

Увод

Овај мастер рад има за циљ стварање комплетне слике која омогућава увид у поступак одређивања напонског стања зидова цеви за већ постојеће средство, односно топ - хаубицу 152 mm М84 НОРА - А и анализирање могућности прекалибрисања цеви 152 mm у цев 155 mm. Отпорност цеви, како за цев топ - хаубице 152 mm тако и за цев хаубице 155 mm јесте одређена двома теоријама и то, Saint Venant и Hubert - Mises - Henki.

У првом поглављу овог рада дат је кратак опис хаубице, као артиљеријског оруђа, са својим основним деловима и склоповима. У наредном делу рада дат је приказ топ - хаубице 152 mm М84 НОРА - А, као и хаубице 155 mm НОРА Б - 52 са свим тактичко - техничким карактеристикама. Такође, приказане су различите хаубице 152 и 155 mm, чиме је омогућен преглед различитих страних решења.

Друго поглавље обухвата детаљну анализу цеви артиљеријског оруђа, и дефинисање прорачуна отпорности цеви. Као што је већ познато, отпорност цеви зависи од максималних напрезања и деформација које се јављају као последица деловања сила на цев. Сила притиска барутних гасова јесте основна сила од које зависе напрезања и деформације, па је и прорачун изведен према овој сили. Осим ове, силе које делују на цев при опаљењу јесу:

- сила међусобног дејства пројектила и цеви,
- сила реакције колевке, противтрзајућег уређаја и гасне кочнице и
- сила инерције при трзању и враћању.

Треће поглавље рада односи се на анализу могућности конверзије цеви 152 mm у цев 155 mm. Под терминим анализа могућности конверзије цеви 152 mm у 155 mm подразумева се анализа могућности извршења најмање потребне реконструкције цеви наведених оруђа узимајући у обзир све релевантне факторе (домет, ефикасност...). У овом делу рада, најпре је дат приказ резултата добијених унутрашње - балистичким прорачуном. Унутрашње - балистички прорачун је решен нумерички методом Рунге - Кута, чији су резултати дати у прилогу 1 и 2 овог рада.

Уз димензије спољне трасе 152 mm и унутрашње трасе цеви 155 mm, нацртана је скица цави у програмском пакету CATIA, на којој су одређени карактеристични пресеци, потребни за даљу анализу прорачуна. Најпре је извршен прорачун отпорности цеви топ - хаубице 152 mm М84 НОРА - А, како би се у даљем делу рада могла приказати упоредна анализа напонског стања зидова цеви за већ постојеће оруђе и напонског стања зидова конвертоване цеви. У виду табела и дијаграма је у трећем поглављу мастер рада дат приказ вредности граничног притиска и стварног степена сигурности добијен по обема теоријама за карактеристичне пресеке цеви постојећег оруђа и карактеристичних пресека конвертоване цеви.

У последњем делу мастер рада приказан је поступак прорачуна напонског стања зидова цеви методом коначних елемената у програмском пакету FEMAP. Уз дефинисање модела цеви потребног за прорачун, затим дефинисања ограничења и оптерећења и мреже коначних елемената, приказано је напонско стање у зидовима цеви, чији спољни пречник одговара цеви постојећег оруђа и то, топ - хаубице 152 mm, док је унутрашња траса цеви та која одговара калибру 155 mm.

1. Хаубица као артиљеријско оруђе

Савремено артиљеријско оруђе представља сложену борбену машину, која у зависности од борбене намене, по конструкцији и спољном изгледу може бити разноврсна. Принцип рада готово свих артиљеријских оруђа је исти, без обзира на ту разноврсност. Он је заснован на коришћењу енергије сагоревања барутног пуњења у цеви оруђа за време процеса опаљења. [2]

Развоју новог артиљеријског оруђа без обзира на тип или врсту увек претходи разрада тактичко - техничких захтева којима се дефинишу најважније карактеристике и перформансе склопова и делова оруђа у целини. Ти захтеви се обично деле на:

- борбене захтеве,
- захтеве послуживања и
- производно - економске захтеве.

Различити борбени задаци које решава артиљерија захтевали су развој више врста оруђа која су различита по калибру, начину лафетације, типу и борбеној намени. Према томе, класификација оруђа може да се изврши на основу више критеријума и то:

- по начину на који пројектил добија почетну брзину:
 - класична и
 - реактивна.
- по конструкцији цеви:
 - оруђа са глатком цеви и
 - оруђа са ожљебљеном цеви.
- по начину превозења на:
 - преносна (лака),
 - вучна и
 - самоходна и самопокретна.
- по начину опаљења и лансирања пројектила из цеви:
 - класична (конвенционална),
 - бестрзајна и
 - ракетна (реактивна).
- према калибру:
 - оруђа малог калибра (од 30 mm до 100 mm),
 - оруђа средњег калибра (од 105 mm до 155 mm) и
 - оруђа великог калибра (преко 155 mm).

- према месту дејства и врсти циља:
 - земаљска,
 - тенковска,
 - ваздухопловна,
 - бродска и
 - обалска.
- према конструктивно - балистичким особинама на:
 - топове,
 - хаубице,
 - минобацаче,
 - топ - хаубице,
 - ракетне бацаче (лансере). [2]

1.1 Основне карактеристике хаубица

Хаубице су намењене за гађање заклоњених циљева. Да би пројектил уништио заклоњени циљ, он мора да има убацну путању. Убацна путања пројектила може да се добије ако се смањи почетна брзина пројектила и повећа елевациони угао. Смањење почетне брзине пројектила постиже се на рачун смањења масе барутног пуњења и дужине цеви.

Маса барутног пуњења код хаубица износи 9 - 15 % од масе пројектила, а почетна брзина од 500 - 900 m/s. Највећи угао елевације код хаубице износи 69 - 80 °. Хаубице имају променљиво барутно пуњење, што омогућава 8 - 12 различитих маса барутног пуњења, чиме се постиже промена путање и домета, а да се не мења угао елевације. Маса хаубице је два до три пута већа од масе топа истог калибра. [2]

1.2 Основни склопови артиљеријског оруђа

Без обзира на велику разноврсност облика и типова артиљеријских оруђа, разликујемо следеће склопове:

- склоп цеви,
- склоп горњег лафета,
- склоп противвртлајућег уређаја и
- склоп доњег лафета.

Делови склопа цеви су:

- цев,
- гасна кочница,
- задњак и
- затварач.

Делови горњег лафета су:

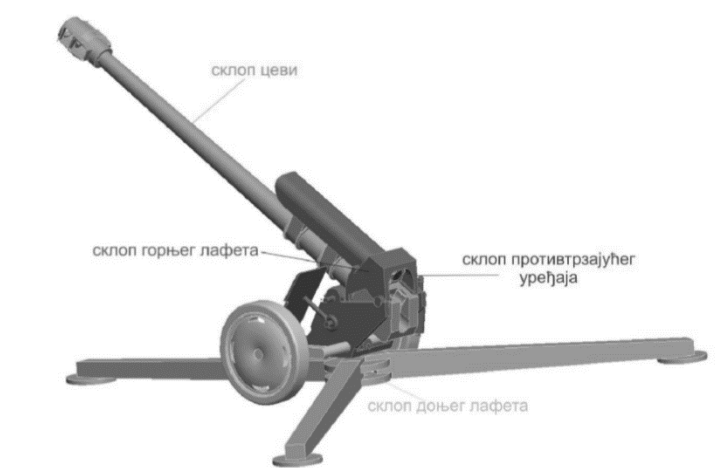
- тело горњег лафета,
- колевка,
- механизми за давање елевације,
- механизми за давање правца,
- изравњачи и
- штитови.

Делови противтрзајућег уређаја:

- повратник.
- кочница трзања и
- кочница враћања.

Делови склопа доњег лафета:

- тело доњег лафета,
- кракови лафета са ашовима,
- дизалица и
- путна осовина са точковима, гибњевима, балансима. [2]



Слика 1.2.1 Приказ артиљеријског оруђа са основним склоповим [2]

1.3 Историјски развој пројекта НОРА

Средином седамдесетих година прошлог века, када је започет рад на пројекту НОРА, јасно је потврђено опредељење за реафирмацију незаменљиве улоге цевне (класниче) артиљерије у систему ватрене подршке копнене војске, са следећим тенденцијама развоја [4]:

- смањивање броја калибара, тако да основно оруђе подршке буде калибар 155 mm или 152 mm, у зависности од војно - политичких опредељења земаља корисника,
- наглашени тактички захтеви да се повећа домет, уведу нови типови муниције са већом ефикасношћу против све разноврснијих циљева, повећа покретљивост и маневар артиљеријских јединица постепеним увођењем већег броја самоходних оруђа, односно ваздушним транспортом вучних оруђа мање масе.

С тога је у оквиру програма развоја новог система основног оруђа ватрене подршке НОРА било планирано да се развију три модела оруђа калибра 152 mm са одговарајућом муницијом, и то:

- вучна топ - хаубица 152 mm НОРА - А (цев дужине 39 калибара); развој започет 1976. године, уведена у наоружање ЈНА 1984. године;
- самоходни топ 152 mm НОРА - Б (цев дужине 45 калибара); развој започет 1984. године, а прекинут крајем 1991. године;
- самопокретни топ 152 mm НОРА - Ц (цев дужине 45 калибара); развој започет 1984. године, а прекинут крајем 1991. године.

Вучна топ - хаубица 152 mm НОРА - А развијена је поступком модернизације руског топа 152 mm Д - 20, са основним циљевима тактичког карактера:

- повећање домета са 17 km на 24 km,
- повећање маневара ватром и то до 63°.

Домет је повећан применом новог балистичког решења:

- уградњом нове цеви дужине 40 калибара са новопројектованом барутном комором запремине око 18 dm³,
- развојем новог разорног пројектила са оптимизованим предњим оживалом и упуштеним дном,
- развојем нове организације барутних пуњења за новопројектовану месингану чауру.

После успрешно извршених испитивања пробне партије оруђа и муниције, систем вучне топ - хаубице 152 mm НОРА - А, усвојен је у оперативну употребу ЈНА као модел М84.

Тако је домаћим развојем освојена серијска производња артиљеријског система друге генерације, који је у то време био на нивоу решења америчке вучне хаубице 155 mm M198.

Фамилију оруђа НОРА чине [4]:

- вучна топ - хаубица 152 mm НОРА - А (М84),
- вучни конвертовани топови 155 mm М46/84 и 152 mm М46/86,
- самопокретна топ - хаубица 152 mm НОРА - Ц и
- самоходне топ - хаубице 152 mm НОРА - Б и 155 mm НОРА - Б52.

Заједничко за сва наведена оруђа је да припадају основном калибру ватрене подршке копнене војске, а могу да се раликују у калибрима 152 mm односно 155 mm (заменом само цеви), зависно од војно - политичког избора корисника. Разлика је само у филозофији употребе типичној за вучна односно самоходна оруђа.

Два од горе наведених оруђа уведена су у оперативну употребу, и то [4]:

- НОРА - А и
- НОРА Б - 52.

1.4 Опис топ - хаубице 152 mm M84 НОРА - А

М84 НОРА - А јесте топ - хаубица калибра 152 mm. Развијена је почетком осамдесетих година у Војно - техничком институту у Београду. Топ - хаубица је пројектована на основу руског топа Д - 20. У наоружање је уведена 1984. године. [8]



Слика 1.4.1 Хаубица 152 mm M84 НОРА - А [7]

Основна намена хаубице 152 mm M84 јесте општа ватрена подршка сопствених јединица. Артиљеријско оруђе, намењено је за извршење следећих задатака [9]:

- уништавање и неутралисање противничких тенкова, артиљеријских оруђа, оклопних транспортера и других борбених возила,
- уништавање и неутралисање непријатељске заклоњене и незаклоњене живе силе,
- разарање објеката који су од посебног тактичког и стратегијског значаја,
- отварање пролаза ужичаним препрекама, противпешадијским и противтенковским минским пољима итд.

За гађање из хаубице 152 mm M84 НОРА се користе дводелни меци са пуним или смањеним променљивим барутним пуњењем. Оруђе и муниција се могу складиштити, транспортовати и поуздано остварити дејство у температурном интервалу од -30°C до $+50^{\circ}\text{C}$.

Топ - хаубица 152 mm M84 НОРА користи следећу муницију:

- метак 152 mm са тренутно - фугасним пројектилом М-84,
- метак 152 mm са тренутно - фугасним пројектилом ОФ-540,
- метак 152 mm са кумулативним пројектилом П-540.

Брзина кретања возила је [8] :

- 60 km/h по асфалтном путу,
- 30 km/h по макадамском путу,
- 10 km/h ван пута.

Табела 1. Технички подаци о оруђу [8]

Технички подаци о оруђу	
Калибар	152/39 mm/cal
Маса пројектила	43,56 kg
Маса највећег барутног пуњења	11,9 kg
Почетна брзина пројектила	820 m/s
Највећи притисак барутних гасова	3000 bar
Највећи домет	24400 m
Поље дејства по елевацији	-5 до 63 °
Поље дејства по правцу	50 °
Највећа брзина гађања	7 мет/мин
Најмања брзина гађања	4 мет/мин
Највећа брзина кретања при вучи	60 km/h
Дужина оруђа на маршу	11,18 m
Ширина оруђа на маршу	2,44 m
Висина оруђа на маршу	2,16 m
Клиренс	0,4 m
Висина ватрене линије	1,385 m
Колотраг	1,985 m
Маса оруђа у борбеном положају	7080 kg
Маса склопа цеви	2950 kg
Маса трзајућих делова	3050 kg
Маса осцилујућих делова	3533 kg
Импулс трзања I_0	53569 Ns
Енергија пројектила E_0	14645 kJ
Коефицијент моћи оруђа C_E	4,170 10^6 kJ/m ³
Коефицијент искоришћења барутног пуњења η_ω	1,273 10^6 kJ/m ³
Коефицијент искоришћења масе оруђа η_c	2068 J/kg
Коефицијент специфичног импулса η_p	0,771 S
Коефицијент пропорционалности масе пројектила C_m	12,40 10^3 kg/m ³

Хаубица поседује двокоморну гасну кочницу, хидропнеуматски ПТУ, полуаутоматски вертикални клинасти затварач, а време превођења из маршевог у борбени положај и обрнуто је од 3 до 5 минута у зависности од обучености послуге.

Оруђе послужује девет послужиоца и то [9]:

- командир одељења,
- нишанција,
- помоћник нишанције,
- пунилац,
- помоћник пуниоца,
- темпирач,
- први додавач,
- други додавач,
- трећи додавач.

1.5 Опис хаубице 155 mm НОРА Б - 52

Нора Б - 52 је самоходна хаубица. Настала је услед потребе за новом, брзом и покретном хаубицом која ће заменити стару.



Слика 1.5.1 Самоходна топ - хаубица 155 mm Нора Б - 52 [10]

Ватрену подршку остварује снажном, изненадном и брзом ватром по циљевима тактичког, оперативног и стратегијског значаја на великим даљинама. Намењена је за [10]:

- уништавање и неутралисање живе силе на маршу, у рејонима прикупљања, у заклонима и ван њих,
- уништавање непријатељских ватрених средстава,
- уништавање снага ваздушних десаната непријатеља, командних места, центара везе, складишта, аеродрома, позадинских база и других циљева распоређених у дубини непријатеља,
- уништавање артиљеријских оруђа, минобацача и других борбених и транспортних средстава непријатеља,
- уништавање оклопних борбених возила и возила специјалне намене непријатеља,
- рушење отпорних тачака, жичаних и других препрека пољског типа и
- прављење пролаза у минским пољима и другим препрекама.

За гађање се користи дводелна муниција са променљивим барутним пуњењем и то [3]:

- пројектил M107,
- пројектил ERSC (Extended Range Sub - Calibre), поткалибарни повећаног домета,
- пројектил ERSB (Extended Range Sub - Bore),
- пројектил ERFB (Extended Range Full - Bore).

Брзина кретања возила је [10]:

- 80 km/h по асфалтном путу,
- 40 km/h по макадамском путу,
- 25 km/h ван пута.

Табела 2. Технички подаци о оруђу

Технички подаци о оруђу	
Калибар / дужина цеви	155/39 mm/cal
Маса пројектила	46,56 kg
Маса највећег барутног пуњења	11,9 kg
Почетна брзина пројектила	826 m/s
Највећи притисак барутних гасова	/
Највећи домет	41000 m
Поље дејства по елевацији	-3 +70 °
Поље дејства по правцу	48,5 °
Дужина оруђа на маршу	/
Ширина оруђа на маршу	/
Висина оруђа на маршу	/
Клиренс	0,28 m
Висина ватрене линије	1,423 m
Колотраг	2,08 m
Маса оруђа у борбеном положају	5760 kg
Маса склопа цеви	1735 kg
Маса трзајућих делова	1810 kg
Маса осцилујућих делова	2200 kg
Импулс трзања I_0	34153 kg
Енергија пројектила E_0	6966 Kj
Коефицијент моћи оруђа C_E	$1,870 \cdot 10^6 \text{ kJ/m}^3$
Коефицијент искоришћења барутног пуњења η_ω	$1,870 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg}$
Коефицијент искоришћења масе оруђа η_c	1211 J/kg
Коефицијент специфичног импулса η_p	0,604 S
Коефицијент пропорционалности масе пројектила C_m	$11,76 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$

Оруђе послужује пет послужιοца и то:

- командир,
- нишанџија,
- возач и
- два послужιοца.

1.6 Преглед страних решења хаубица 152 mm и 155 mm

1.6.1 Француска самоходна хаубица 155 mm Цезар

Цезар јесте француска топ - хаубица у калибру 155 mm. Топ - хаубица је развијена из Ф3 самоходне хаубице базиране на шасији АМХ - 13 лаког тенка, чија је производња започета 2007. године. [11]



Слика 1.6.1.1 Самоходна хаубица 155 mm Цезар [12]

1.6.2 Јужноафричка самоходна хаубица 155 mm Г6

Г6 је јужноафричка самоходна хаубица. Развој је започет крајем 1970. године, док је серијска производња започета између 1988. и 1999. године. У време када је представљен, Г6 се сматрао једним од мобилних самоходних хаубица у употреби. Г6 јесте релативно велико возило у конфигурацији 6x6. [13]



Слика 1.6.2.1 Јужноафричка самоходна хаубица 155 mm Г6 [14]

1.6.3 Кинеска самоходна хаубица 155 mm ПЛЗ45

ПЛЗ45 је самоходна хаубица калибра 155 mm, развијена почетком 1990. године. Модел ПЛЗ45 темељи се на вучној хаубици Туре88, са цевима дужине 45 калибара. Самоходну хаубицу ПЛЗ45 користи народноослободилачка армија Кине, Алжира и Кувајта. [15]



Слика 1.6.3.1 *Кинеска самоходна хаубица 155 mm ПЛЗ45 [15]*

1.6.4 Хаубица 155 mm ФХ - 70

ФХ - 70 је вучна хаубица калибра 155 mm, коју је током 1970. године у заједничком пројекту развило неколико земаља. Сам пројекат хаубице започет је 1962. године, када је уочена потреба за новом хаубицом. Намера је била да уђе у наоружање до 1970. године, па отуда и сам назив. ФХ - 70 је заједнички пројекат Уједињеног Краљевства, Немачке и Италије. [16]



Слика 1.6.4.1 *Хаубица 155 mm ФХ - 70 [17]*

1.6.5 Америчка хаубица 155 mm M198

Хаубица M198 је средње величине, вучена артиљеријска јединица, калибра 155 mm, развијена за потребе у војсци Сједињених Америчких Држава. Наручена је као замена за хаубицу M144 155mm, која потиче још из Другог светског рата. Осим у америчкој, хаубица M198 користи се и у ирачкој, пакистанској и аустријској војсци. [18]



Слика 1.6.5.1 *Америчка хаубица 155 mm M198* [19]

1.6.6 Кинеска самоходна хаубица 152 mm Type 83

Туре 83 развијен је од Туре 66 152 mm, вучне топ - хаубице, копије совјетског 152 mm модела Д - 20. Хаубица Туре 83 додатно је опремљена полуаутоматским пуњачем и екстрактом дима. [15]



Слика 1.6.6.1 *Кинеска самоходна хаубица 152 mm Type 83* [15]

1.6.7 Руска самоходна хаубица 152 mm МСТА - С

Руска самоходна хаубица МСТА - С 152 mm је уведена у употребу још 1989. године. МСТА - С се базира на ходном делу истом оном који се коритиси на тенковима Т - 72 и Т - 80. Хаубица од 152 mm производ је фирме Barrikady State Production Association. [20]



Слика 1.6.7.1 *Руска самоходна хаубица 152 mm МСТА - С* [5]

1.6.8 Руска самоходна хаубица 2С3 Akatsiya 152 mm

2С3 Akatsiya 152 mm развијен је у Совјетском Савезу као одговор на појаву америчке М109 хаубице. Пројекат је почео 1967. године, а серијска производња 1971. године и трајала је све до 1993. године. [21]



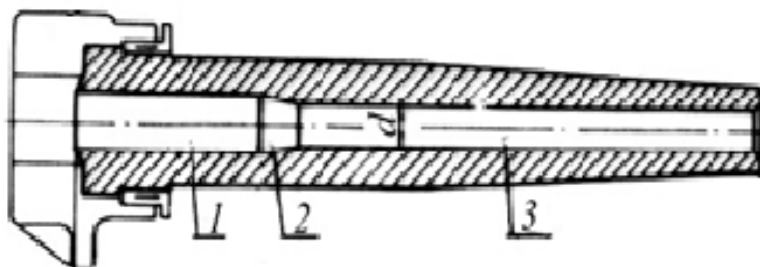
Слика 1.6.8.1 *Руска самоходна хаубица 2С3 Akatsiya 152 mm* [5]

Табела 3. Технички подаци о оруђу

Назив оруђа	Калибар	Висина	Дужина	Ширина	Брзина кретања оруђа	Посада
Француска самоходна хаубица Цезар	155 mm	3,7 m	10 m	2,55 m	100 km/h	5 – 6
Јужноафричка самоходна хаубица Г6	155 mm	3,8 m	10,34 m	3,4 m	90 km/h	5
Кинеска самоходна хаубица ПЛЗ45	155 mm	2,6 m	10,5 m	3,3 m	55 km/h	5
Хаубица ФХ - 70	155 mm	2,45 m	9,8 m	2,58 m	/	8
Америчка хаубица М198	155 mm	2,9 m	11 m	2,8 m	/	9
Кинеска самоходна хаубица Туре 83	152 mm	3,52 m	10,52 m	3,3 m	55 km/h	5
Руска самоходна хаубица МСТА - С	152 mm	2,99 m	7,15 m	3,38 m	60 km/h	5
Руска самоходна хаубица 2С3 Akatsiya	152 mm	3,05 m	8,4 m	3,25 m	63 km/h	4

2. Цев артиљеријског оруђа

Цев представља дебелозидни цилиндар, чија се унутрашња целина назива канал цеви. Намена цеви артиљеријског оруђа јесте извршење опаљења метка и лансирање пројектила са дефинисаном почетном брзином и правцем лета. Канал цеви се састоји од барутне коморе, прелазног конуса и водишта пројектила, што је приказано на слици испод. [1]



Слика 2.1 Шема моноблок цеви [1]

1 - барутна комора, 2 - прелазни конус, 3 - водиште пројектила

Барутна комора је глаткозидни део у коме се смешта барутно пуњење које се налази у чаури метка или амбалажи без чауре. Прелазни конус спаја барутну комору и водиште пројектила, док водиште пројектила представља део по ком се креће пројектил приликом опаљења.

За цев, која представља главни део оруђа, основни задатак јесте да се из задатог калибра при опаљењу, пројектилу одређене масе, саопшти почетна брзина и обезбеди стабилност лета у потребном правцу.

Без обзира на конструктивне облике цеви, основни захтев који морају да задовоље цеви оруђа је њена отпорност и уздужна чврстоћа. Наиме, отпорност и уздужна чврстоћа цеви зависе од структуре њених зидова. У условима експлоатације, цев трпи изузетно високе притиске и температуре, па је због тога неопходно посветити се отпорности цеви, како би своју задату функцију она обављала у што дужем временском периоду и са што већом поузданошћу. [1]

2.1 Врсте цеви

Зависно од начина израде водишта пројектила у каналу цеви, разликују се две врсте цеви [1]:

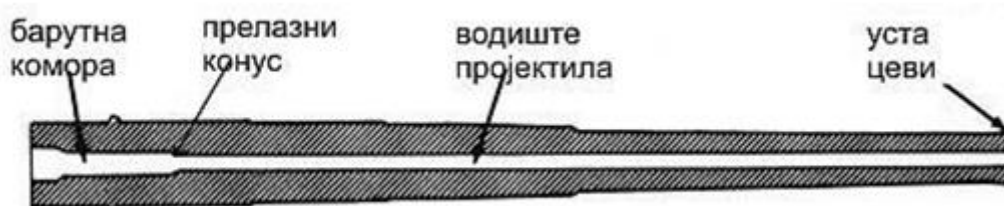
- ожљебљене и
- глатке цеви.

Ожљебљена цев служи како би се пројектилу дао правац лета, да му се саопшти почетна брзина и обртно кретање, које му обезбеђује стабилност за време лета. Ожљебљене цеви се углавном примењују код топова, хаубица, али и савремених минобацача.

Глатка цев служи да се аеродинамички стабиланом пројектилу саопшти правац лета и почетна брзина. Глатке цеви се примењују код савремених тенковских и противоклопних оруђа. Да би цеви оруђа могле да издрже што веће притиске барутних гасова, ојачавају се различитим поступцима. У зависности од начина ојачања, разликују се следеће врсте цеви [1]:

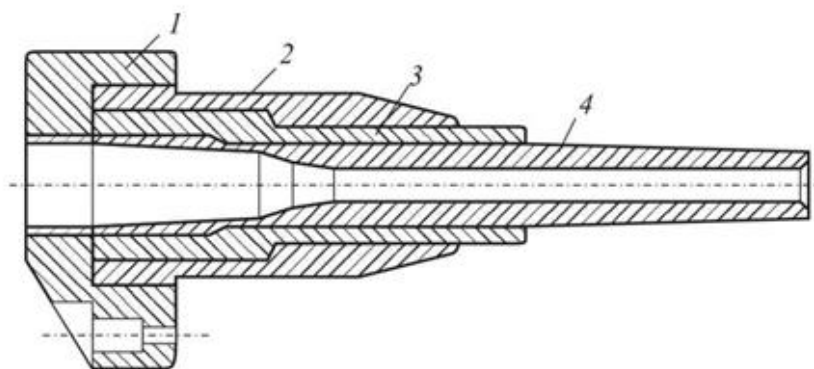
- неојачана - моноблок цев,
- ојачана (библок, триблок, мултиблок) цев,
- слободна цев са кошуљицом и
- самоојачана (аутофретована) цев.

Неојачана - моноблок цев израђена је из једног комада. Израђује се са ожљебљеним и глатким каналом. Једноставна је по конструкцији и економична за производњу. Недостатак јој је у томе што се у случају истрошености мора цела мењати. Међутим, постојећим методама повећања отпорности цеви и коришћењем за њену израду висококвалитетног легираног челика, век употребе јој је знатно продужен, тако да се из ње може испалити више хиљада метака, а да се не промене њене балистичке карактеристике. Моноблок цеви налазе широку примену код оруђа малог и средњег калибра. [1]



Слика 2.1.1. Моноблок цев [1]

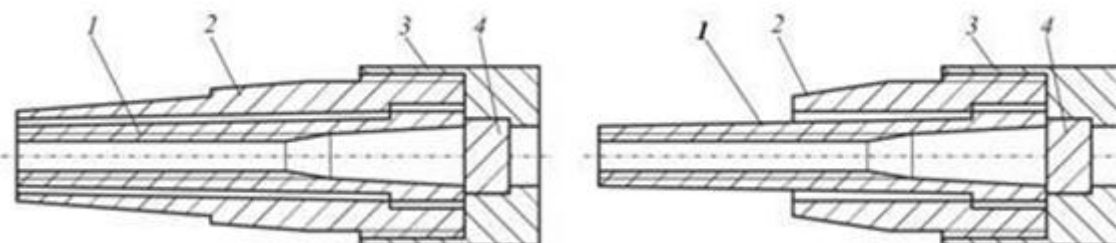
Ојачана цев састављена је од две или више цеви навучених једна на другу са преклопом у загрејаном стању. При хлађењу спољна цев стеже унутрашњу, стварајући у њеним зидовима тангенцијални напон стезања. При опаљењу, због дејства притиска барутних гасова, цев се шири и у њеним унутрашњим слојевима се ствара тангенцијални напон истезања. Као резултат алгебарског сабирања напона, различитих по знаку, апсолутна величина резултујућег напрезања ојачане цеви биће мања од аналогног напрезања које се јавља у моноблок цеви, под условом да су обе цеви изложене дејству притиска исте величине. Према томе, ојачана цев може да издржи знатно већи притисак од моноблок цеви. Недостатак ове цеви је у томе што је њена производња знатно сложенија од производње моноблок цеви. Углавном се примењује код оруђа већих калибра. [1]



Слика 2.1.2 Ојачана (триблок) цев [1]

1 - задњак, 2 - спољашњи слој, 3 - међуслој, 4 - унутрашња цев

Слободна цев са кошуљицом састоји се од унутрашње цеви и кошуљице која је на њу навучена са зазором у границама 0,05 - 0,2 mm за оруђа средњег калибра и 0,15 - 0,25 mm за оруђа већег калибра. При опаљењу, унутрашња цев се у почетку шири до контакта са кошуљицом, а затим се при даљем нарастању притиска барутних гасова шири заједно са кошуљицом. После опаљења зазор између цеви и кошуљице се поново успоставља. Кошуљица може бити навучена дуж целе дужине цеви или само на задњем делу цеви. Добра особина ове цеви је у томе што се истрошена цев замењује новом, док се кошуљица и даље користи. [1]



Слика 2.1.3 Слободна цев са кошуљицом [1]

1 - цев, 2 - кошуљица, 3 - задњак, 4 - затварач

Самоојачана (аутофретована) цев је израђена из једног комада. У фази израде ове цеви њен канал се подвргава таквом унутрашњем хидрауличном притиску при коме унутрашњи слој цеви добија трајне деформације, а спољашњи слој еластичне деформације. После престанка дејства хидрауличног притиска, остаје спољни слој напрегнут на истезање. При опаљењу, напрезања проузрокована притиском барутних гасова се сумирају са напрезањима створеним самоојачањем. На тај начин се резултујуће напрезање у самоојачаној цеви смањује, па је самоојачана цев знатно отпорнија од неојачане моноблок цеви. [1]

2.2 Отпорност цеви

Однос спољашњег према унутрашњем радијусу код цеви оруђа јесте у границама [1]:

$$a_{21} = r_2 / r_1 \geq 1,2 \div 2 \quad (2.1)$$

Цеви оруђа су дебелозидни цилиндри оптерећени веома високим притисцима. Такви притисци нису познати код осталих топлотних машина, па се прорачун отпорности цеви оруђа разликује од прорачуна танкозидних цеви и љуски, котлова, резервоара и сл. Прорачун отпорности цеви уопште као дебелозидног и осносиметричног тела познат је као Ламеов проблем који у потпуности важи и у случају цеви оруђа. [1]

Отпорност цеви зависи од максималних напрезања и деформација које се јављају као последица деловања сила на цев. Сила притиска барутних гасова јесте основна сила од које зависе деформације и напрезања, па је и прорачун отпорности изведен према овој сили. Прорачун отпорности цеви подразумева одређивање максималних напрезања и деформација у зиду цеви од дејства силе унутрашњег притиска и њихово поређење са допуштеним величинама. При опаљењу цев је изложена сложенем стању напрезања која узрокују сложене деформације, које се условно могу разложити на [1]:

- u - радијалне, а релативне радијалне ε_r ,
- v - тангенцијалне, а релативне тангенцијалне ε_t ,
- w - аксијалне, а релативне аксијалне ε_z .

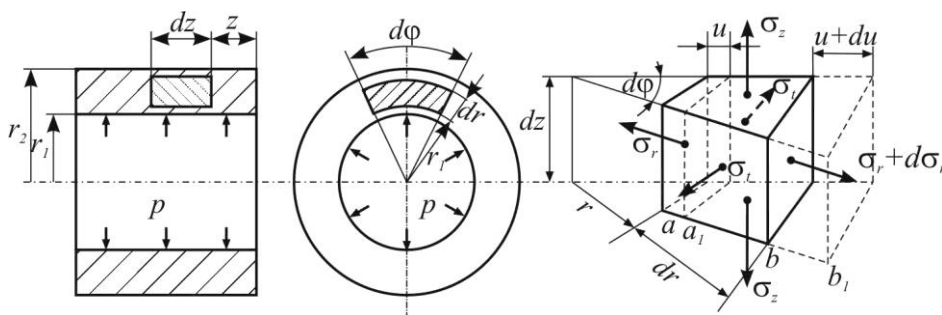
Са деформацијама у зиду цеви, истовремено, настају и одговарајућа главна напрезања:

$$\sigma_r, \sigma_t \text{ и } \sigma_z \quad (2.2)$$

и одговарајућа изведена или еквивалента напрезања:

$$E\varepsilon_r, E\varepsilon_t \text{ и } E\varepsilon_z \quad (2.3)$$

Да би се одредиле деформације у зиду цеви, разматра се елементарни исечак материјала цеви у облику цилиндра са полупречницима r и $r + dr$, што је приказано на слици испод. Под деловањем унутрашњег притиска p , овај прстен ће претрпети слободну деформацију.



Слика 2.2.1 Шема напрезања и деформација цеви [1]

Тачка a преместиће се у тачку a_1 за величину u , а тачка b у b_1 за величину $u + du$. Према томе, прираштај дебљине зида цеви је:

$$\overline{a_1b_1} - \overline{ab} = (dr + u + du) - (u + dr) = du \quad (2.4)$$

Релативна радијална деформација биће једнака:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (2.5)$$

Релативна тангенцијална деформација одређује се из односа обима посматраног слоја радијуса r после и пре деформације, па је:

$$\varepsilon_t = \frac{2\pi(r + du) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{u}{r} \quad (2.6)$$

Аксијална деформација, по истој аналогiji, биће:

$$\varepsilon_z = \frac{dw}{dr} \quad (2.7)$$

Да би се нашла зависност између ε_r и ε_t , диференцирамо ε_t по независно променљивој r , па је:

$$\frac{d\varepsilon_t}{dr} = \frac{d}{dr} \left(\frac{u}{r} \right) = \frac{1}{r} \left(\frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right) = \frac{1}{2} (\varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (2.8)$$

Из претходне релације се види да промена деформација ε_r и ε_t не зависи од ε_z .

На елемент слоја, према претходној слици, нормално на његове површине делују еластичне силе које га држе у равнотежи. Ако силе буду пројектоване на правац радијуса, добија се:

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\varphi dz - \sigma_r r d\varphi dz - 2\sigma_t dr dz \sin \frac{d\varphi}{2} = 0 \quad (2.9)$$

Пошто су правци деловања напрезања σ_r и σ_t у смеру одговарајућих оса, тангенцијална (или ободна) напрезања σ_t су она чији правац лежи у тангенти на круг прстена цеви.

Како су чланови $\sin \frac{d\varphi}{2} \cong \frac{d\varphi}{2}$ и $d\sigma_r dr = 0$, када се претходни израз среди, добија се:

$$\frac{rd\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_t = 0 \quad (2.10)$$

Ово је једначина која даје везу између радијалног и тангенцијалног напрезања. Француски научник Ламе јесте први извео ову једначину.

Уколико се еластичне силе пројектују на правац осе z , добија се да је:

$$d\sigma_t = 0 \quad (2.11)$$

Из овога следи да је:

$$\sigma_t = \text{const.} \quad (2.12)$$

Пошто су σ_r и σ_t две непознате, за решење једначине треба поставити још једну једначину везе.

Решење за извођење овакве једначине произилази из анализе деформација материјала. Хипотеза која се користи јесте да попречни пресеци цеви остају паралелни пре и после деформације, тј. да релативна аксијална деформација не зависи за један попречни пресек од радијуса r и да је константна за један попречни пресек $\varepsilon_z = \text{const}$, односно:

$$\frac{d\varepsilon_z}{dr} = 0 \quad (2.13)$$

За троосно стање напрезања цеви, према Хуковом закону следи:

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_t + \sigma_r)] \quad (2.14)$$

Где су:

E - модул еластичности материјала,

μ - Поасонов коефицијент, за челик износи $\mu \cong 1/3$,

σ_t - тангенцијално напрезање зидова цеви,

σ_z - аксијално напрезање зидова цеви,

σ_r - радијално напрезање зидова цеви.

Такође, када се претходни израз диференцира по r и изједначи са нулом, добија се нови израз:

$$\frac{d\varepsilon_z}{dr} = -\mu \frac{d}{dr} \sigma_r + \sigma_t = 0 \quad (2.15)$$

Уколико је $\sigma_r + \sigma_t = \text{const}$, онда је овај услов испуњен:

$$\sigma_r + \sigma_t = 2A \quad (2.16)$$

Када се претходна једначина уврсти у једначину:

$$\frac{rd\sigma_r}{dr} + \sigma_r - \sigma_t = 0 \quad (2.17)$$

добива се релација:

$$\frac{rd\sigma_r}{dr} + 2\sigma_r = 2A \quad (2.18)$$

која када се прошири са rdr , има облик:

$$2r\sigma_r dr + r^2 d\sigma_r = 2rA dr \quad (2.19)$$

Претходна једначина, у диференцијалном облику погодном за интеграљење гласи:

$$\frac{d}{dr} r^2 \sigma_r = \frac{d}{dr} r^2 A \quad (2.20)$$

Након интеграљења, решење је:

$$r^2 \sigma_r + B = r^2 A \quad (2.21)$$

Аксијално напрезање зидова цеви и радијално напрезање зидова цеви, може да се изрази преко Ламеових константи, па је:

$$\sigma_r = A - \frac{B}{r^2} \quad (2.22)$$

$$\sigma_t = A - \frac{B}{r^2} \quad (2.23)$$

A – прва константа интеграције,

B – друга константа интеграције,

r - произвољни радијус цеви.

Ламеове константе интеграције одређују се на унутрашњој и спољашњој граници цеви, из почетних услова:

$$\sigma_{r1} = (\sigma)_{r=r_1} = -p_1 \quad (2.24)$$

$$\sigma_{r2} = (\sigma)_{r=r_2} = p_2 \quad (2.25)$$

Уколико се узме да је спољни притисак на цев једнак атмосферском притиску, па се он може занемарити у односу на унутрашњи притисак барутних гасова $p = p_1$, па је $p_2 \cong 0$ онда константе интеграције имају следећи облик:

$$A = \frac{p_1 r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (2.26)$$

$$B = \frac{p_1 r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (2.27)$$

Када је цев оптерећена и спољашњим притиском $p_2 \neq 0$, Ламеове константе интеграције су:

$$A = \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (2.28)$$

$$B = (p_1 - p_2) \frac{r_1^2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (2.29)$$

Како би релације биле једноставније написане, уводе се ознаке за односе радијуса цеви:

$$a_{21} = r_2 / r_1 \quad (2.30)$$

$$a_{2r} = r_2 / r \quad (2.31)$$

$$a_{1r} = r_1 / r \quad (2.32)$$

$$a_{11} = 1 \quad (2.33)$$

$$a_{22} = 1 \quad (2.34)$$

па израз за тангенцијално напрезање зидова цеви гласи:

$$\sigma_t = \frac{p_1(a_{2r}^2 + 1) - p_2(a_{21}^2 + a_{2r}^2)}{a_{21}^2 - a_{11}^2} > 0 \quad (2.35)$$

Док израз за радијално напрезање цеви има облик:

$$\sigma_r = \frac{p_1(a_{2r}^2 + 1) + p_2(a_{21}^2 - a_{2r}^2)}{a_{21}^2 - a} < 0 \quad (2.36)$$

На унутрашњој површини цеви, главна напрезања достижу вредност према:

$$\sigma_{t1} = \frac{p_1(a_{21}^2 + 1) - 2p_2a_{21}^2}{a_{21}^2 - 1} \quad (2.37)$$

$$\sigma_{r1} = -p_1 \quad (2.38)$$

док на спољашњој површини цеви она имају вредност:

$$\sigma_{t2} = \frac{2p_1 - p_2(a_{21}^2 + 1)}{a_{21}^2 - 1} \quad (2.39)$$

$$\sigma_{r2} = -p_2 \quad (2.40)$$

Поред овог случаја, постоје и специјални случајеви оптерећења цеви, и то:

1. Ситуацији када је $p_1 = 0$

У случају када је цев оруђа у мировању, тачније док не гађа, ако је на њу у топлом стању навучена друга цев - навлака. Навлака при гађању све јаче притеже на цев споља притиском p_2 . Према томе релације за тангенцијално и аксијално напрезање зидова цеви имају облик:

$$\sigma_t = -p_2 \frac{(a_{21}^2 + a_{2r}^2)}{a_{21}^2 - 1} \quad (2.41)$$

$$\sigma_r = p_2 \frac{(a_{21}^2 + a_{2r}^2)}{a_{21}^2 - 1} \quad (2.42)$$

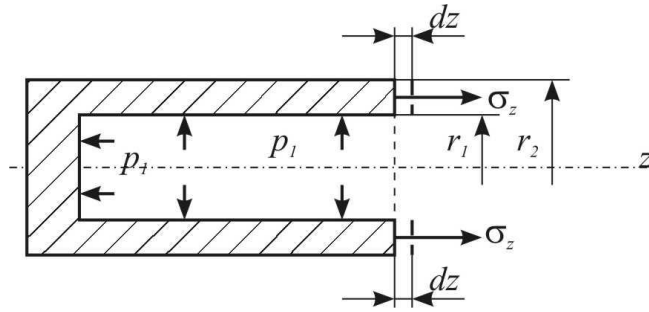
2. Ситуацији када је $p_2 = 0$

Друга ситуација представља случај који одговара реалном процесу опаљења цеви из оруђа, па изрази за тангенцијално и радијално напрезање зидова цеви имају следећи облик:

$$\sigma_t = p_1 \frac{a_{2r}^2 + 1}{a_{21}^2 - 1} \quad (2.43)$$

$$\sigma_r = -p_1 \frac{a_{2r}^2 - 1}{a_{21}^2 - 1} \quad (2.44)$$

Поред тангенцијалног и радијалног, треће главно напрезање јесте аксијално или уздужно напрезање зидова цеви σ_z . Оно представља однос свеукупне уздужне силе F_z и целог попречног пресека који ту силу преноси.



Слика 2.2.2 Аксијално напрезање зидова цеви [1]

Уздужно напрезање зидова цеви је за један попречни пресек константо и износи:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (2.45)$$

Како је сила притиска на дно цеви (чело затварача):

$$F_z = p_1 r_1^2 \pi \quad (2.46)$$

онда је аксијално напрезање:

$$\sigma_z = p_1 \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (2.47)$$

Уколико се према релацији (2.43) изврши краћа анализа главних напрезања σ_r и σ_t на екстремним радијусима моноблок цеви за $r = r_1$ и $r = r_2$, онда се добија:

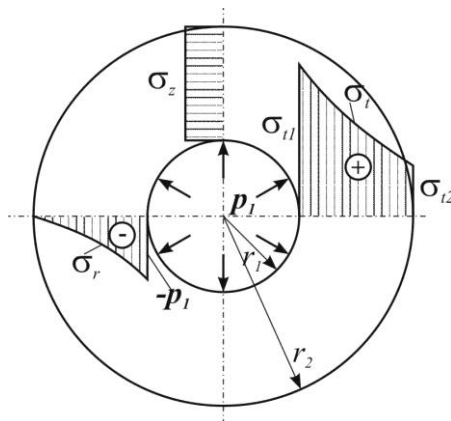
$$\sigma_{t1} = p_1 \frac{r_2^2 + r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = \sigma_{t1\max} \quad (2.48)$$

$$\sigma_{t2} = p_1 \frac{2r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} = \sigma_{t2\min} \quad (2.49)$$

$$\sigma_{r1} = -p_1 = \sigma_{r1\max} \quad (2.50)$$

$$\sigma_{r2} = 0 = \sigma_{r2\min} \quad (2.51)$$

На основу добијених резултата, главна напрезања се могу квалитативно илустровати дијаграмом који је приказан испод.



Дијаграм 2.2.1 Напрезања моноблок цеви [1]

Резултатима прорачуна, закључује се да:

- сви слојеви цеви нису равномерно оптерећени
- најоптерећенији је унутрашњи слој цеви,
- тангенцијално напрезање је највеће
- аксијално напрезање је најмање.

2.3 Еластична отпорност цеви

Еластична отпорност цеви представља максимални унутрашњи притисак којим цев може да се оптерети, а да, при томе, не дође до пластичних деформација.

Може се означити са p_{1gr} , тако да може да се каже да еластична отпорност представља највећи гранични притисак који цев може еластично да издржи. Експериментима је показано да дефинисање граничног стања није ни најмање једноставно, јер је потребно знати како интензитета главних напрезања, тако и њихове међусобне односе, нарочито ако се ради о троосном стању напрезања и већем броју комбинација тих односа. Из тих разлога је потребно сложено напрезање довести до облика, који може да се пореди са одговарајућим напрезањем једноосно оптерећене епрувете.

Приликом проналажења таквог облика сложеног напрезања, од стране научника су развијене различите теорије чврстоће, односно, критеријуми чврстоће. Према томе, у даљем раду биће дефинисана четири критеријума. [1]

2.3.1 Критеријум највећих нормалних напрезања (Галилеј)

Гранично стање напрезања, односно, пластична деформација, јавља се када, по апсолутној вредности, највеће главно напрезање достигне вредност границе пластичности материјала. У овом случају, код моноблок цеви, тангенцијално напрезање јесте највеће напрезање на унутрашњем слоју цеви, тако да се критеријум највећих нормалних напрезања може написати на следећи начин [6]:

$$|\sigma_{t1}| = \sigma_e \quad (2.52)$$

$$\sigma_e = p_1 \frac{a_{21}^2 + 1}{a_{21}^2 - 1} \quad (2.53)$$

$$p_{1gr}^I = \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{a_{21}^2 + 1} \quad (2.54)$$

2.3.2 Критеријум највећих линеарних деформација (Saint - Venant, Mariott)

Други критеријум чврстоће цеви има широку примену при пројектовању цеви и даје знатно боље резултате од претходног.

Када највећа по апсолутној вредности величина линеарне деформације достигне допуштену границу настаје лом материјала, односно почетак пластичних деформација. На основу овако дефинисаног критеријума моћи ће да се дефинише услов у општем облику:

$$|\varepsilon| = \varepsilon_e \quad (2.55)$$

За материјале за које важи Хиков закон, ако се занемаре аксијална напрезања, може да се напише релација:

$$\varepsilon = \frac{1}{E} (\sigma_t - \mu \sigma_r) \quad (2.56)$$

Како су код моноблок цеви највеће релативне деформације на унутрашњем слоју тангенцијалне деформације, онда се користи Хуков закон па горњи услов може да се изрази преко изведених тј. еквивалентних напрезања у тангенцијалном смеру, па следи да је:

$$(E\varepsilon_t)_{\max} = \sigma_t - \mu \sigma_r \leq \sigma_e \quad (2.57)$$

После сређивања, израз добија следећи облик:

$$(E\varepsilon_t)_{\max} = \frac{2}{3} p_1 \frac{2a_{21}^2 + 1}{a_{21}^2 - 1} \leq \sigma_e \quad (2.58)$$

одакле следи да је:

$$p_{1gr}^{\text{II}} = \frac{3}{2} \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{2a_{21}^2 + 1} \quad (2.59)$$

Из претходне две релације могу да се изведу следећи релевантни закључци:

1. Обзиром да су главна напрезања $\sigma_r < 0$ и $\sigma_t > 0$, закључујемо да су апсолутне вредности еквивалентних напрезања већа од главних напрезања, тачније:

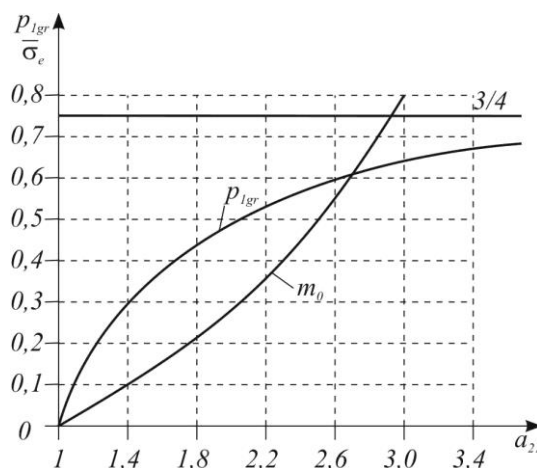
$$E\varepsilon_t > \sigma_t \text{ и } |E\varepsilon_r| > |\sigma_r| \quad (2.60)$$

2. Максимална вредност (теоријаска) границе еластичне отпорности цеви по другом критеријуму одређује се када је $r_2 \rightarrow \infty$. Ако се потражи лимес функције према претходној релацији, добија се:

$$(p_{1gr}^{\text{II}})_{\max} = \frac{3}{4} \sigma_e \quad (2.61)$$

Може се показати да повећање еластичне отпорности цеви са повећањем дебљине зидова цеви (радијуса r_2), има смисла само до одређене вредности a_{21} , с обзиром да се добија несразмерно много већа маса цеви у односу на њену отпорност.

На слици испод приказан је дијаграм који показује како се мења p_{1gr} при познатом материјалу цеви у зависности од односа полупречника цеви. Са дијаграма се види да је најповољнији однос $a_{21} \cong 2,2 \div 2,5$, како би се добила најрационалнија маса цеви.



Дијаграм 2.3.2.1 Отпорност цеви [6]

2.3.3 Критеријум највећих тангенцијалних напрезања (Кулона и Треска)

По овом критеријуму чврстоће, пластичне деформације настају онда када највеће резултујуће смицајуће напрезање у зиду цеви достигне величину дозвољеног граничног напрезања. Максимално резултујуће смицајуће напрезање према прорачуну код цеви на унутрашњој површини износи:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{t1} - \sigma_{r1}}{2} = \frac{\sigma_{t1} + p_1}{2} \quad (2.62)$$

У случају чистог истезања, следи да је $\sigma = \sigma_e$, па се максимално резултујуће смицајуће напрезање рачуна по изразу:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_e}{2} \quad (2.63)$$

Еластична отпорност цеви, по критеријуму највећих тангенцијалних напрезања се одређује релацијом:

$$p_{1gr}^{III} = \frac{\sigma_e}{2} \left(\frac{a_{21}^2 - 1}{a_{21}^2} \right) \quad (2.64)$$

Уколико је цев оптерећена и изнутра и са спољашње стране, а што представља општи случај, може се написати [6]:

$$p_{1gr}^{III} = \frac{\sigma_e}{2} \left(\frac{a_{21}^2 - 1}{a_{21}^2} \right) + p_2 \quad (2.65)$$

2.3.4 Критеријум енергије промене облика (Hubert - Mises - Henki)

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. Специфична енергија деформације може да се изрази као збир специфичних енергија промене запремине тела и специфичне енергије промене облика тела, уколико важи Хуков закон. [6]

Израз за критеријум енергије промене облика се може приказати као:

$$(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_t)^2 = 2\sigma_e^2 \quad (2.66)$$

Како би се добио израз за еластичну отпорност моноблок цеви по критеријуму енергије промене облика, разматра се случај који је ближи пракси, а једноставнији за прорачуне када је $\sigma_z = 0$ и $\sigma_r = -p_1$.

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

$$\sigma_{t1}^2 - 2\sigma_{t1}\sigma_{r1} + \sigma_{r1}^2 + \sigma_{r1}^2 + \sigma_{t1}^2 = 2\sigma_e^2 \quad (2.67)$$

односно:

$$\sigma_{t1}^2 - \sigma_{t1}\sigma_{r1} + \sigma_{r1}^2 = \sigma_e^2 \quad (2.68)$$

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

$$p_{1gr}^{IV} = \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{\sqrt{3a_{21}^4 + 1}} \quad (2.69)$$

Овај критеријум чврстоће у потпуном је складу са експерименталним резултатима, посебно за танкозидне цеви и сматра се потпунијим у односу на претходне, али су прорачуни на бази ове теорије гломазнији. Поред критеријума Saint - Venant, у последње време, овај критеријум се најчешће користи у пракси при дефинисању еластичне отпорности моноблок цеви.

Приликом прегледа сва четири критеријума, може се дати коментар за исте.

Поређењем релација за еластичну отпорност цеви по другом и трећем критеријуму, израз гласи:

$$\frac{p_{1gr}^{II}}{p_{1gr}^{III}} = \frac{\frac{3}{2}\sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{2a_{21}^2 + 1}}{\frac{\sigma_e}{2} \frac{a_{21}^2 - 1}{a_{21}^2}} = \frac{3}{2 + \frac{1}{a_{21}^2}} > 1 \quad (2.70)$$

Закључује се да у свим случајевима трећи критеријум даје мању величину дозвољеног притиска у цеви. Уколико се обезбеде једнака изведена напрезања зидова цеви по једној и другој теорији, онда се по другој теорији добијају мање дебљине зидова цеви у односу на димензије цеви које су прорачунате према трећој.

Уколико је релативна дебљина зида цеви $a_{21} = \sqrt{2}$, добија се да је $p_{1gr}^{II} = 1,2 p_{1gr}^{III}$.

Уз услов једнаке еластичне отпорности цеви, односно $p_{1gr}^{II} = p_{1gr}^I$ и релативној дебљини зида цеви $a_{21} = \sqrt{2}$, на основу израза за прву и другу теорију чврстоће цеви следи:

$$p_{1gr}^{II} = p_{1gr}^I = \frac{3}{2} \frac{a_{21}^2 - 1}{2a_{21}^2 + 1} = \frac{a_{21}^2 - 1}{2a_{21}^2} = \frac{1}{4} \quad (2.71)$$

Одавде су димензије цеви одређене по првој теорији чврстоће:

$$(a_{21}^2) = \frac{4a_{21}^2 - 1}{a_{21}^2 + 2} = \frac{7}{4} \quad (2.72)$$

односно:

$$a_{21}^I = \frac{\sqrt{7}}{2} \quad (2.73)$$

Релативно смањење дебљине зидова цеви одређено према релацији за трећу теорију чврстоће износи:

$$\frac{a_{21}^I - a_{21}}{a_{21} - 1} = \frac{\frac{\sqrt{7}}{2} - \sqrt{2}}{\sqrt{2} - 1} = -19,5\% \quad (2.74)$$

Уколико су димензије цеви једнаке ($a_{21}^I = a_{21}^{IV}$), онда су величине еластичне отпорности цеви по другој и четвртој теорији повезане следећом релацијом:

$$\frac{p_{1gr}^I}{p_{1gr}^{IV}} = \frac{3}{2} \frac{\sqrt{3a_{21}^4 + 1}}{2a_{21}^2 + 1} > 1 \quad (2.75)$$

Уколико је релативна дебљина зидова цеви $a_{21}^2 = 2$, онда према претходној релацији следи да је:

$$\frac{p_{1gr}^I}{p_{1gr}^{IV}} = \frac{3\sqrt{13}}{10} = 1,08 \quad (2.76)$$

Први и четврти критеријум се најчешће користе у пракси и при томе дају практично једнаке резултате.

2.4 Коефицијент сигурности цеви

При производњи и пројектовању цеви оруђа, један од основних задатака састоји се у томе да се обезбеди сигурна чврстоћа цеви, јер у експлоатацији, цев трпи изузетно велике температуре и притиске на својој унутрашњој површини. 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 подмазана и при свим дозвољеним одступањима у маси барутног пуњења пројектила. При изради цеви мора да се узме у обзир нехомогеност материјала цеви и знатне промене механичких особина метала под утицајем температуре.

С тим у вези, дозвољена напрезања цеви морају да буду мања од границе еластичности материјала, како при опаљењу не би дошло до појаве трајних деформација.

Постоје два начина како би се повећао степен сигурности цеви, и то [6]:

- повећање дебљине зидова цеви, односно повећање полупречника r_2 и
- повећање границе еластичности материјала цеви σ_e .

Коефицијент сигурности цеви може да се изрази у следећем облику [6]:

$$n = \frac{p_{1gr}}{p_b} \quad (2.77)$$

p_{1gr} - граница еластичне отпорности цеви,

p_b - балистички притисак.

Обзиром да је притисак барутних гасова у цеви променљива величина и мења се према кривој притиска, јасно је да он није исти у сваком попречном пресеку цеви што доводи до тога да је дебљина зида различита у појединим попречним пресецима цеви.

Према томе, сваки пресек цеви има свој коефицијент сигурности. На основу бројних експерименталних испитивања за карактеристичне пресеке цеви при прорачуну препоручују се следеће минималне вредности коефицијената:

- за пресеке у пределу барутне коморе коефицијент сигурности се креће у границама $n_k = 0,8 \div 0,9$ и то ако се не рачуна отпорност делова спојених са цеви, као што су задњак, омотач цеви, навртка цеви и сл. У супротном се узима да је $n_k \leq 1,0$.
- за пресеке од почетка жљебова до пресека где се постиже највећи притисак барутних гасова и где се канал цеви излаже највећем загревању услед дејства температуре при опаљењу, коефицијент сигурности не сме бити мањи од $n_{oz} \geq 1,2 \div 1,3$.
- за пресеке у области уста цеви, коефицијент сигурности је највећи и не сме бити мањи од $n_u \geq 1,9$.

3. Прорачун отпорности цеви и анализа могућности конверзије цеви топ - хаубице 152 mm M84 НОРА - А у цев 155 mm

Топ - хаубица 152 mm има неојачану моноблок цев са 48 жљебова и прогресивним углом увијања удесно и то 0,07854 rad на почетку жљебљеног дела и 0,15592 rad на устима цеви. Израђена је од хром - никл - молибден челика, чија је граница развлачења већа од $100 \cdot 10^7 \text{ N} / \text{m}^2$. Укупна дужина цеви је 6, 056 m, дужина барутне коморе је 1, 006 m, а жљебљеног дела је 5, 05 m.

У даљем делу рада биће приказан поступак дефинисања напонског стања цеви, услед дејства притиска барутних гасова при опаљењу.

За израду цеви, данас се користе, као што је познато различите врсте тврдых челика високих механичких карактеристика. Без обзира на различите врсте и типове челика за израду цеви, сви они морају да имају одређене физичко - механичке карактеристике, као на пример:

- високу чврстоћу,
- добру еластичност и жилавост, како при високим притисцима барутних гасова не би дошло до пластичних деформација, прскотина, разарања, као и
- довољну тврдоћу и високу отпорност на ударна оптерећења и механичка трења.

Граница еластичне отпорности цеви може се одредити према различитим теоријама, док ће у раду она бити одређена двома и то Saint Venant и Hubert - Mises - Henki.

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

$$p_{1gr}^I = \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{a_{21}^2 + 1} \quad (3.1)$$

По теорији Hubert - Mises - Henki, као што је већ речено, пластично стање настаје онда када потенцијална енергија промене облике јединичине запремине материјала у посматраној тачки пређе граничну вредност специфичне енергије деформације.

$$p_{1gr}^{IV} = \sigma_e \frac{a_{21}^2 - 1}{\sqrt{3a_{21}^4 + 1}} \quad (3.2)$$

3.1 Анализа резултата прорачуна отпорности цеви топ – хаубице 152 mm M84 НОРА - А

Према наведеним обрасцима извршени су прорачуни напонског стања зидова цеви у 16 карактеристична попречна пресека.

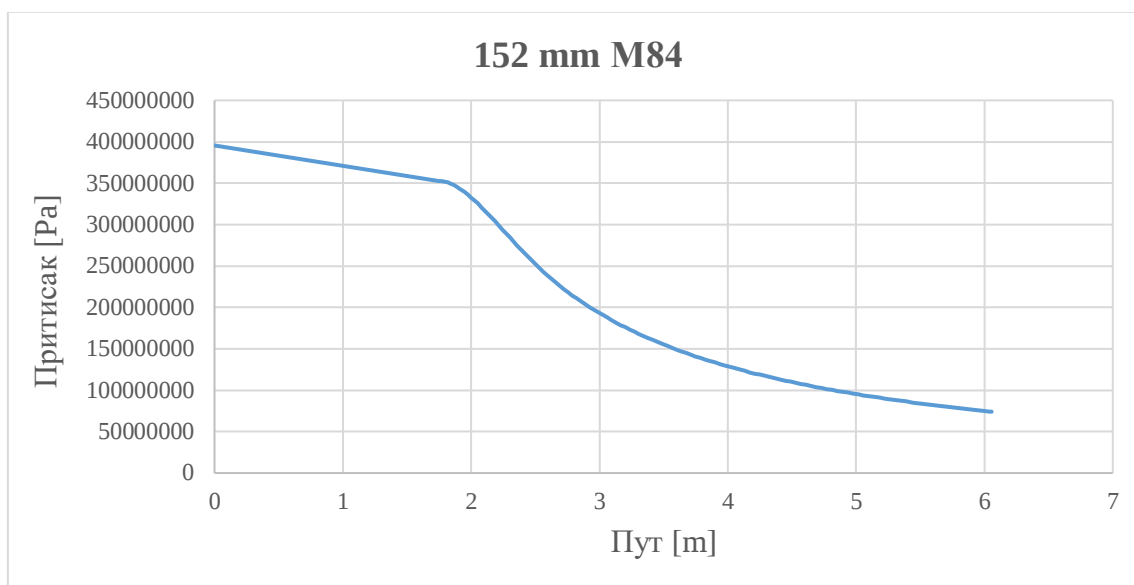
Усвајајући да челик хром - никл - молибден има $\sigma_e = 100 \cdot 10^7 \text{ N / m}^2$ и стављајући у однос вредности притиска барутних гасова који је добијен УБ прорачуном и вредности граничног притиска, добијене су вредности стварног коефицијента сигурности цеви у посматраним пресецима.

Најпре је одрађен унутрашње - балистички прорачун, са улазним подацима датим у табели.

Табела 4. Улазни подаци потребни за унутрашње - балистички прорачуна

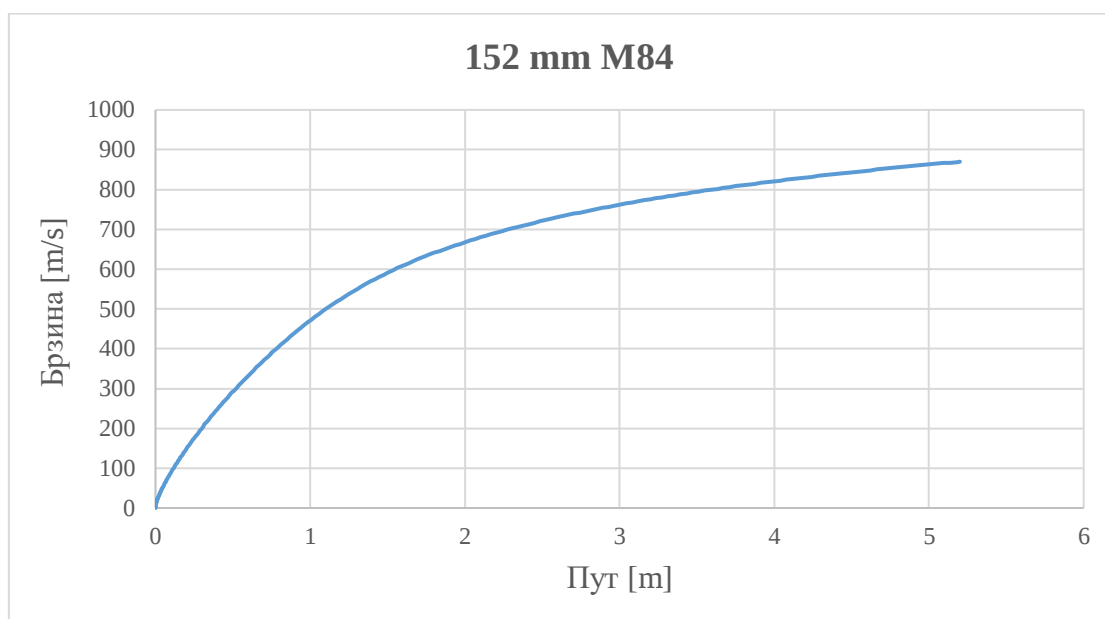
Површина пресека цеви	0,01875 m ²
Површина пресека пројектила	0,01875 m ²
Запремина коморе	0,0187 m ³
Маса пројектила	43,5 kg
Коефицијент брзине сагоревања	0,0081E-6
Густина прогресивног барута	1600 kg/m ³
Коефицијент адијабате дег. Барута	1,2
Коефицијент брзине сагоревања дег. бар.	0,0009E-6
Густина дегресивног барута	1600 kg/m ³
Коефицијент адијабате дег. Барута	1,2
Број канала дегресивног барута	19
Пречник зрна	14E-03 m
Пречник канала централни	1,75E-03 m
Пречник канала периферни	0,4E-03 m
Дужина зрна	14,5E-03 m
Маса прогресивног барута	12,1 kg
Свод дегресивног барута	0,00125 m
К	1,000245
Л	-0,000244
μ	0.0
Маса дегресивног барута	0,09 kg
Сила прогресивног барута	995450 J/kg
Пут пројектила у цеви	5,2 m
Коефицијент фиктивности	1,06
Коволумен барутних гасова прог. барута	0,97E-03
Температура сагоревања	2900 K
Притисак форсирања	300E+05
Корак интеграције	0.0005
Сила дегресивног барута	965000 J/kg
Коволумен барутних гасова дег. барута	0.97E-03

Унутрашње - балистички прорачун је одрађен стандардним термодинамичким моделом који је решен нумерички методом Рунге - Кута. У прилогу 1 овог рада дат је приказ резултата на основу којих су формиран дијаграми зависности притисак - пут и брзина - пут. УБ прорачун је извршен за топ - хаубицу 152 mm M84 са пројектилом М90 са променљивим пуним барутним пуњењем. На дијаграму 3.1.1 дат је приказ промене притиска по пређеном путу. Са дијаграма се види да је максимални притисак барутних гасова на затварач 3955 bar - а, док је максимални притисак на пројектил 3527 bar - а.



Дијаграм 3.1.1 Промена притиска барутних гасова у зависности од пута

На дијаграму 3.1.2 дат је приказ промене брзине у зависности од пута. Укупан пут који је пројектил прешао јесте 5,2 m, док је брзина пројектила на устима цеви 869 m/s.



Дијаграм 3.1.2 Промена брзине у зависности од пута

Прорачун напонског стања зидова цеви извршен је у шеснаест карактеристичних пресека. У даљем делу рада табеларно и у виду дијаграма је дат приказ резултата прорачуна стварног степена сигурности за цев топ - хаубице 152 mm M84 методама Saint - Venant и Hubert - Mises - Henki.

Стварна отпорност цеви не сме да буде мања од жељене отпорности. Вредност стварног степена сигурности одређује се тако што се вредност граничног притиска подели са вредношћу добијеног балистичког притиска у карактеристичним пресецима. У табели 5 дат је приказ одабраних карактеристичних пресека, дужина на којима се они налазе и вредности притисака у истим.

Резултати вредности стварног степена сигурности методом Saint - Venant приказани су у табели 6. Из табеле се види да се вредност степена сигурности у пределу уста цеви креће око 1, затим у пределу где је цев ожељбљена износи око 1,4 па иде и до преко 2, а на устима цеви провером отпорности цеви методом Saint - Venant , степен сигурности прелази 4.

У табели 7 приказан је резултат прорачуна степена сигурности цеви топ - хаубице 152mm M84 методом Hubert - Mises - Henki. Вредности степена сигурности прорачунати овом методом дају сличне резултате као и претходна. То су вредности од 0,9 до 1,20 у пределу барутне коморе, затим од 1,3 до 2 у жљебљеном делу цеви и око 3,9 у пределу уста цеви.

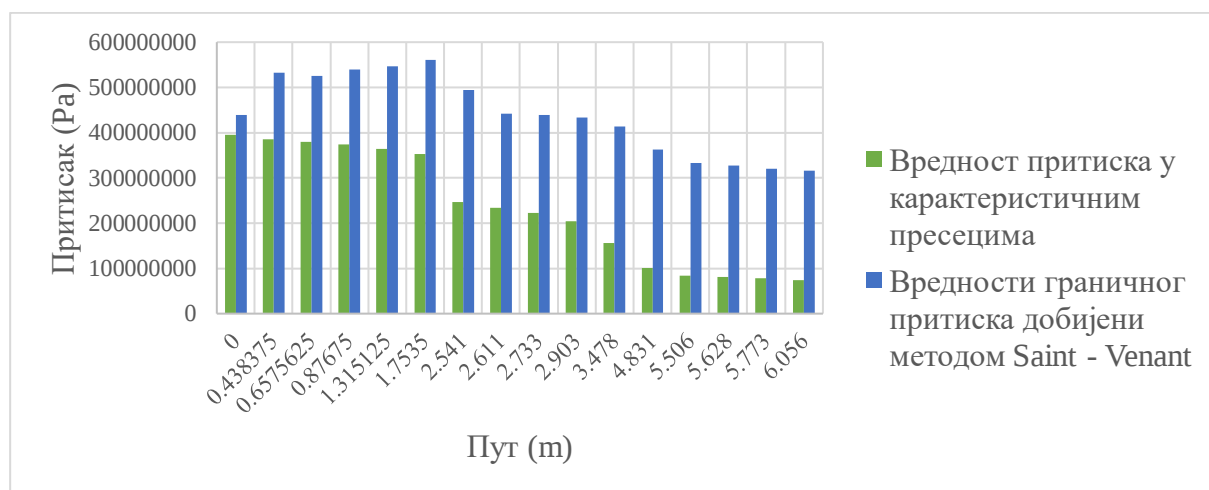
Табела 5. Приказ одабраних карактеристичних пресека, пређеног пута и притиска

r ₂ [mm]	r ₁ [mm]	Пут [m]	Притисак у карактеристичним пресецима [Pa]
155	87.75	0	395546600
190	87.75	0.438375	384835715
177.5	83.45	0.6575625	379479462.5
177.5	80.5	0.87675	347123750
177.5	79.1	1.315125	363412325
177.5	76	1.7535	352700900
150	76	2.541	246647540.3
135	76	2.611	234201400
134.059	76	2.733	222060200
132.747	76	2.903	203757600
128.31	76	3.478	155843200
117.87	76	4.831	100342300
112.658	76	5.506	83575620
111.716	76	5.628	81090940
110.595	76	5.773	78725220
110	76	6.056	74016380

Табела 6. Приказ резултата притисака и степена сигурности добијених методом Saint - Venant

Притисак у карактеристичним пресецима [Pa]	Вредност граничног притиска (Saint – Venant, Mariott) [Pa]	Стварни степен сигурности
395546600	439235494.1	1.110451952
384835715	533164867.7	1.385434997
379479462.5	526084793.4	1.386332715
347123750	540185846.7	1.443869433
363412325	546766814.9	1.504535695
352700900	561073071.8	1.59079002
246647540.3	494052308.2	2.00307008
234201400	442227537.5	1.888236097
222060200	438491971.3	1.974653591
203757600	433175322.6	2.125934554
155843200	414211314.8	2.657872238
100342300	362784128.1	3.615465542
83575620	332922143.5	3.983483982
81090940	327186131.1	4.034805012
78725220	320216891	4.06752615
74016380	316453162.5	4.275447712

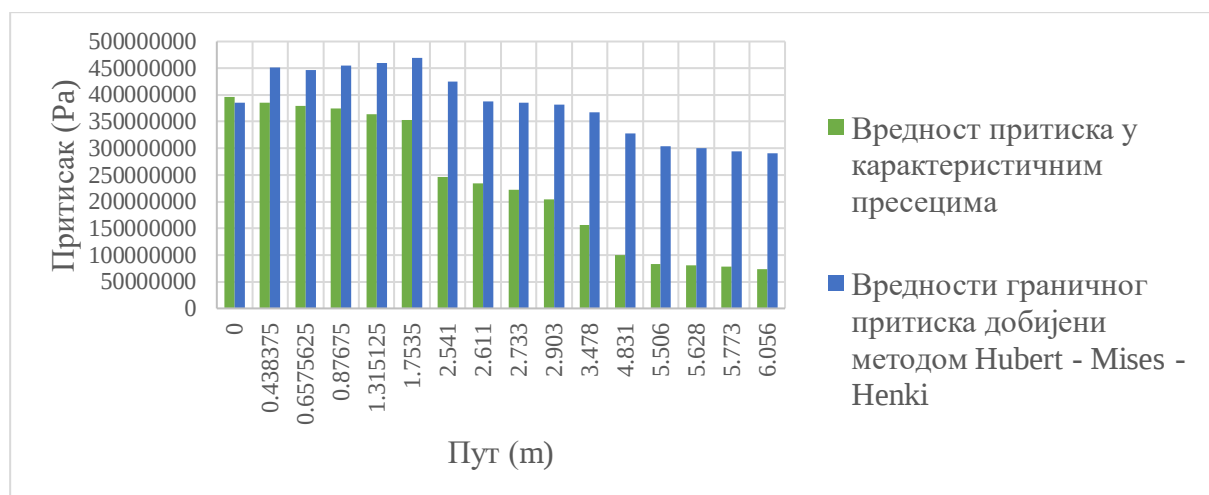
На дијаграму 3.1.3 дат је приказ притисака у карактеристичним пресецима, као и вредности граничног притиска прорачунатог методом Saint - Venant.

**Дијаграм 3.1.3** Приказ вредности балистичког притиска и граничног притиска добијеног методом Saint - Venant

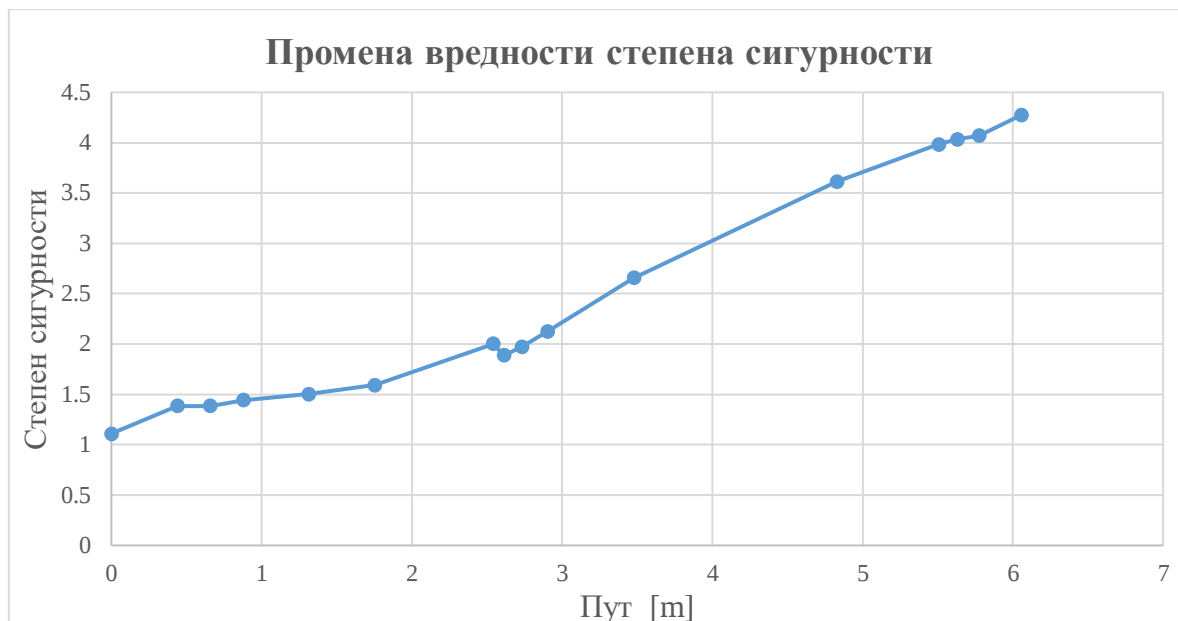
Табела 7. Приказ резултата притисака и степена сигурности добијених методом Hubert - Mises - Henki

Притисак у карактеристичним пресецима [Pa]	Вредност граничног притиска (Hubert - Mises - Henki) [Pa]	Стварни степен сигурности
395546600	385759586.5	0.97525699
384835715	450797147.3	1.171401535
379479462.5	446119264.8	1.175608455
347123750	455400351	1.217245232
363412325	459682961.6	1.264907462
352700900	468886209.1	1.32941597
246647540.3	424500890.8	1.721083009
234201400	387931513.1	1.656401341
222060200	385218832.1	1.73474955
203757600	381340142.9	1.871538254
155843200	367334136.5	2.357075166
100342300	328006915.7	3.268879781
83575620	304272585.3	3.640685948
81090940	299638620.6	3.695093688
78725220	29394641.6	3.734204129
74016380	290903266.3	3.930255253

Као и на претходном дијаграму, и на дијаграму 3.1.4 дат је приказ вредности балистичког притиска у карактеристичним пресецима, и вредност граничног притиска добијен методом Hubert - Mises - Henki.

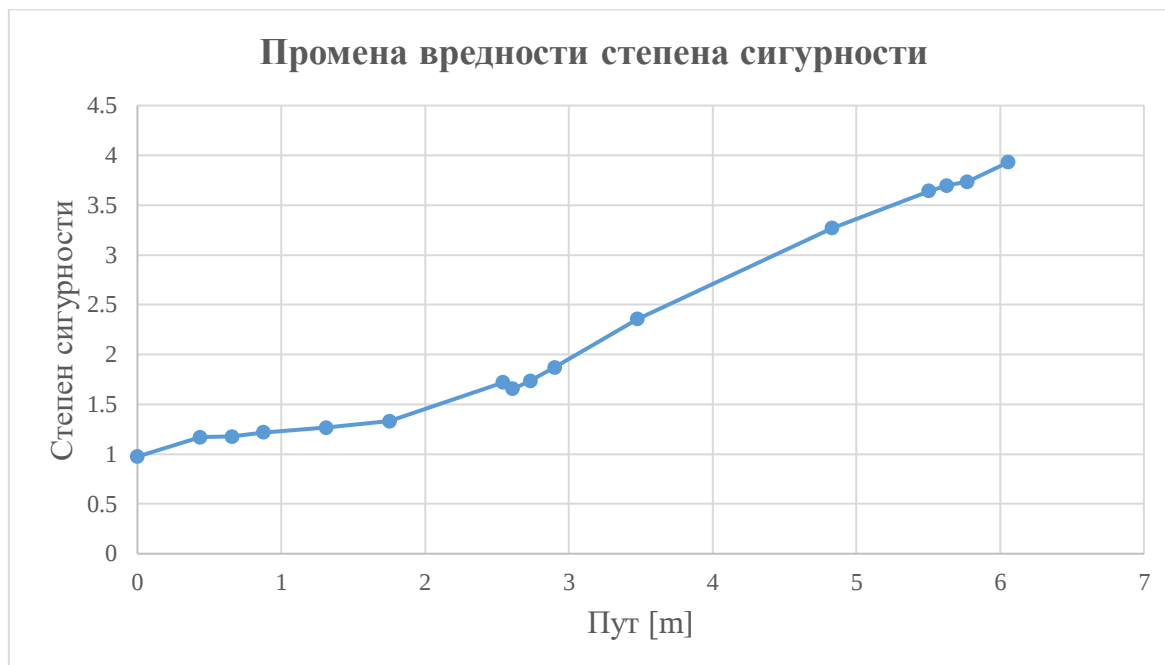
**Дијаграм 3.1.4** Приказ вредности балистичког притиска и граничног притиска добијеног методом Hubert - Mises - Henki

На дијаграму 3.1.5 приказана је промена вредности степена сигурности, који је прорачунат за топ - хаубицу 152 mm M84, методом Saint - Venant.



Дијаграм 3.1.5 Промена вредности степена сигурности одређена методом Saint - Venant

На дијаграму 3.1.6 дат је приказ промене стварног степена сигурности одређен методом Hubert - Mises - Henki.



Дијаграм 3.1.6 Промена вредности степена сигурности одређена методом Hubert - Mises - Henki

3.2 Анализа могућности конверзије цеви

Као што је већ речено, отпорност цеви се одређује максималним напрезањем и деформацијама у зидовима цеви, при деловању сила у процесу опаљења. Основна сила, од које зависи отпорност цеви, настаје од притиска барутних гасова.

У даљем раду, приказан је поступак испитивања отпорности конвертоване цеви, како би се извршило поређење са вредностима за већ постојеће средство. Најпре је извршен унутрашње - балистички прорачун, који решен нумерички методом Рунге - Кута. Улазни подаци потребни за прорачун приказани су табели испод, док је решење прорачуна дато у прилогу 2 овог рада.

Наиме, анализа могућности конверзије цеви 152 mm у цев 155 mm извршена је на начин који је приказан у даљем делу.

Табела 8. Улазни подаци потребни за унутрашње - балистички прорачун

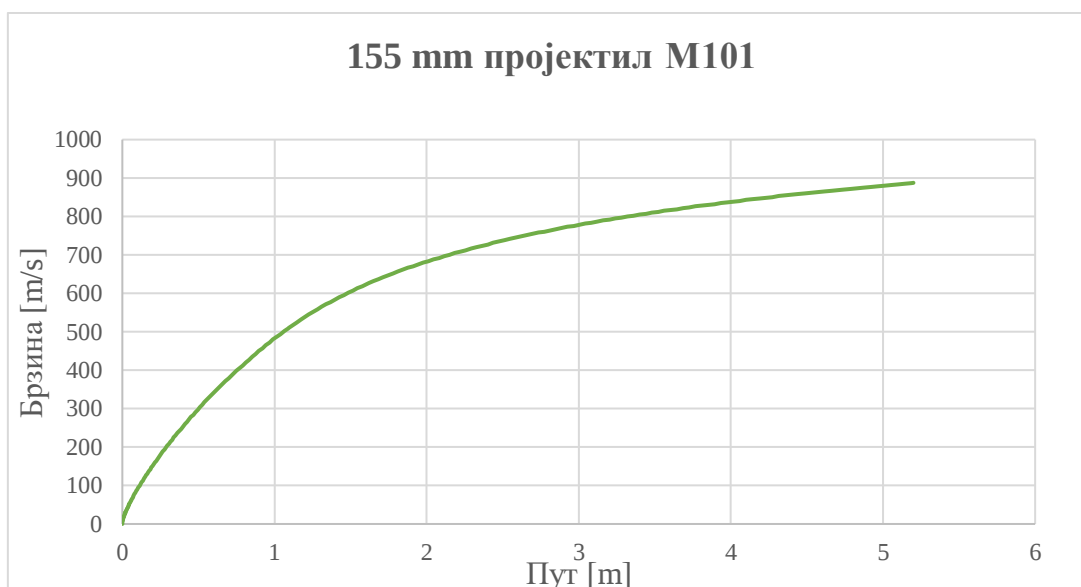
Површина пресека цеви	0,01923 m ²
Површина пресека пројектила	0,01923 m ²
Запремина коморе	0,01875 m ³
Маса пројектила	43,5 kg
Коефицијент брзине сагоревања	0,0076E-6
Густина прогресивног барута	1600 kg/m ³
Коефицијент адијабате дег. барута	1,2
Коефицијент брзине сагоревања дег. бар.	0,0009E-6
Густина дегресивног барута	1600 kg/m ³
Коефицијент адијабате дег. барута	1,2
Број канала дегресивног барута	19
Пречник зрна	14E-03 m
Пречник канала централни	1.75E-03 m
Пречник канала периферни	0,4E-03 m
Дужина зрна	14,5E-03 m
Маса прогресивног барута	12,3 kg
Свод дегресивног барута	0,00125 m
К	1,000245
Λ	-0,000244
μ	0.0
Маса дегресивног барута	0,09 kg
Сила прогресивног барута	975450 J/kg
Пут пројектила у цеви	5,2 m
Коефицијент фиктивности	1,06
Коволумен барутних гасова прог. барута	0,97E-03
Температура сагоревања	2900 K
Притисак форсирања	300E+05
Корак интеграције	0.0005
Сила дегресивног барута	965000 J/k
Коволумен барутних гасова дег. барута	0.97E-03 m ³ /kg

На дијаграму 3.2.1 дат је приказ промене притиска барутних гасова у зависности од пређеног пута. Унутрашње - балистички прорачун је одређен за конвертовану цев са пројектилом М101. Са дијаграма се види да максимални притисак барутних гасова на затварач износи 4055 bar - а, док је вредност максималног притиска на пројектил 3603 bar - а.



Дијаграм 3.2.1 *Промена притиска барутних гасова у зависности од пута за конвертовану цев*

На дијаграму 3.2.2 дат је приказ промене брзине у зависности од пређеног пута. Пут који пројектил прелази јесте 5,2 m, а брзина пројектила на устима цеви износи 887 m/s.



Дијаграм 3.2.2 *Промена брзине у зависности од пута за конвертовану цев*

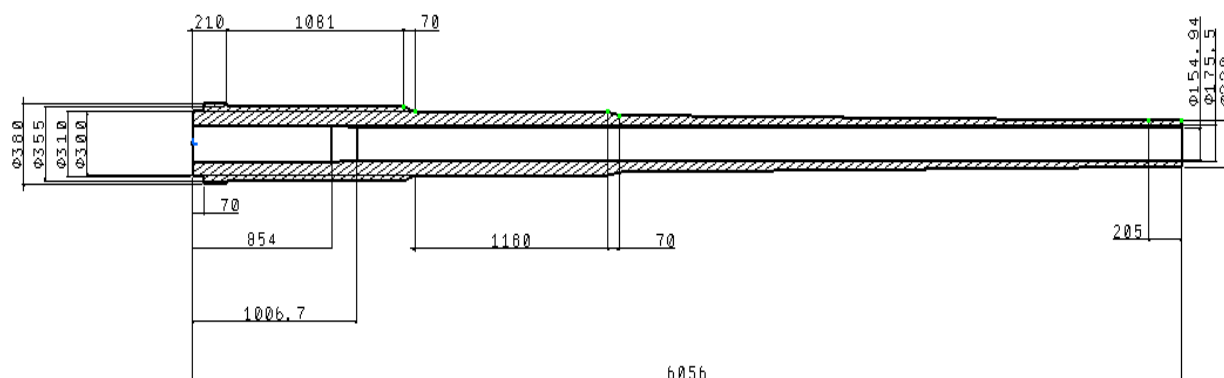
Поступак прорачуна напонског стања зидова цеви одређен је, као што је већ речено, у шеснаест карактеристичних пресека. Карактеристични пресеци су узети на одређеним растојањима од почетка цеви (табела 9).

Табела 9. Приказ одабраних карактеристичних пресека, пређеног пута и притиска

r_2 [mm]	r_1 [mm]	Пут [m]	Максимални притисак у карактеристичним пресецима [Pa]
155	87.75	0	405564300
190	87.75	0.438375	394258825
177.5	83.45	0.6575625	388606087
177.5	80.5	0.87675	382953350
177.5	79.1	1.315125	371647875
177.5	77.47	1.7535	360342400
150	77.47	2.541	250101400
135	77.47	2.611	240885600
134.059	77.47	2.733	223851200
132.747	77.47	2.903	204911700
128.31	77.47	3.478	158084300
117.87	77.47	4.831	100638900
112.658	77.47	5.506	84385720
111.716	77.47	5.628	82657230
110.595	77.47	5.773	79369840
110	77.47	6.056	74564370

На основу познатих података за вредности спољашњег и унутрашњег пречника цеви, у програмском пакету САТИА моделирана је цев.

На слици 3.1.1 тад је технички цртеж конвертоване цеви, са свим дефинисаним величинама.

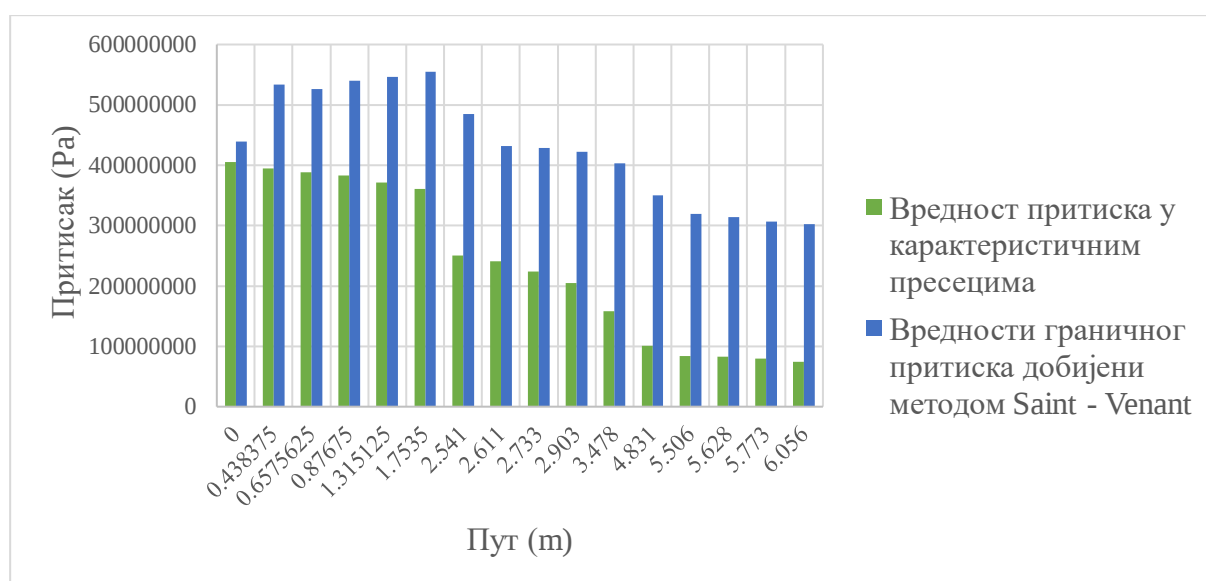


Слика 3.1.1 Технички цртеж конвертоване цеви

Табела 10. Приказ резултата притисака и степена сигурности добијених методом Saint - Venant

Максимални притисак у карактеристичним пресецима [Pa]	Вредност граничног притиска (Saint – Venant, Mariott) [Pa]	Стварни степен сигурности
405564300	439235494.1	1.083023072
394258825	533164867.7	1.352321962
388606087	526084793.4	1.35377394
382953350	540185846.7	1.410578721
371647875	546766814.9	1.47119586
360342400	554335609	1.538357987
250101400	485231800.8	1.940140282
240885600	431905941.4	1.792991949
223851200	428065862.9	1.912278616
204911700	422601321.2	2.062358182
158084300	403117960.3	2.550018948
100638900	350346506.4	3.481223527
84385720	319746882.1	3.789111263
82657230	313872786.5	3.797281695
79369840	306737338.1	3.864658643
74564370	302884561.7	4.062054862

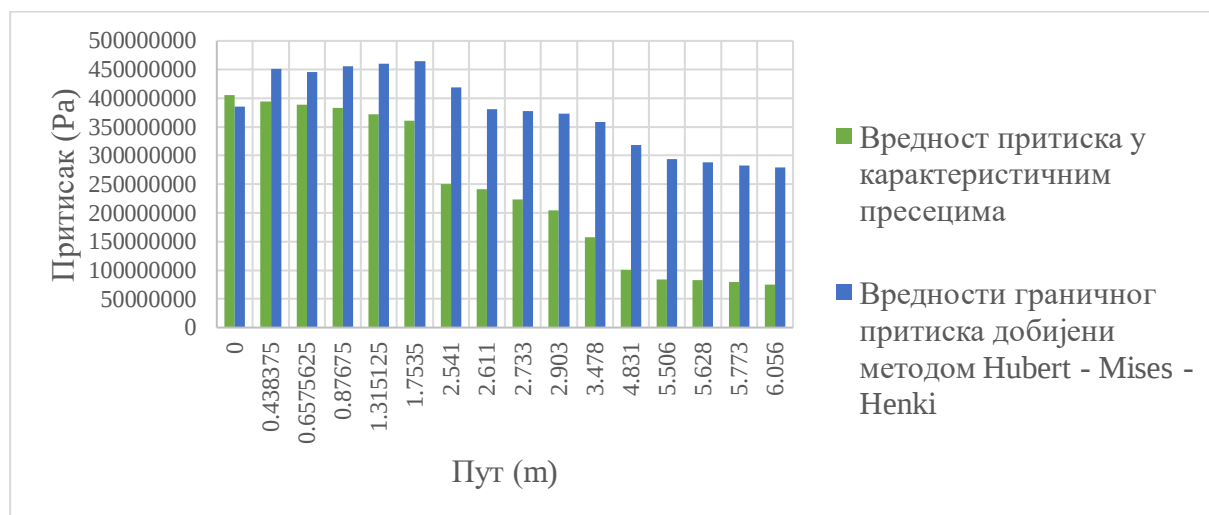
На дијаграму 3.2.3 дат је приказ вредности балистичког притиска и граничног притиска добијеног методом Saint - Venant. Вредност граничног притиска у односу на вредност балистичког притиска је већа.

**Дијаграм 3.2.3** Приказ вредности балистичког притиска и граничног притиска добијеног методом Saint - Venant

Табела 11. Приказ резултата притисака и степена сигурности добијених методом Hubert - Mises - Henki

Максимални притисак у карактеристичним пресецима [Pa]	Вредност граничног притиска (Hubert – Mises - Henki) [Pa]	Стварни степен сигурности
405564300	385759586.5	0.951167513
394258825	450797147.3	1.143404075
388606087	446119264.8	1.147998654
382953350	455400351	1.189179703
371647875	459682961.6	1.236877681
360342400	464570136.8	1.289246386
250101400	418416535.2	1.672987577
240885600	380410978.8	1.579218429
223851200	377592822.2	1.686802761
204911700	373563611.5	1.823046764
158084300	359017091	2.271048365
100638900	318201284.8	3.161812031
84385720	293592880.8	3.479177292
82657230	288790654.7	3.493834172
79369840	282923583.6	3.564623333
74564370	279740366.4	3.751662709

На дијаграму 3.2.4 дат је приказ вредности балистичког притиска и граничног притиска добијеног методом Hubert - Mises - Henki.

**Дијаграм 3.2.4** Промена вредности степена сигурности одређена методом Hubert - Mises - Henki за конвертовану цев

На дијаграму 3.2.5 дат је приказ промене вредности степена сигурности за конвретовану цев одређен методом Saint - Venant.



Дијаграм 3.2.5 Приказ вредности балистичког притиска и граничног притиска добијеног методом Saint - Venant

На дијаграму 3.2.5 дат је приказ промене вредности степена сигурности за конвретовану цев одређен методом Huber - Mises - Henki.



Дијаграм 3.2.6 Промена вредности степена сигурности одређена методом Huber - Mises - Henki за конвретовану цев

Резултати добијени дефинисаним методама који су приказани у виду дијаграма се могу прокоментарисати на следећи начин. На дијаграму 3.2.3 дат је приказ вредности балистичког и граничног притиска који су добијени методом Saint - Venant. Са дијаграма се види да је вредност граничног у односу на балистички притисак већа. Затим је на дијаграму 3.2.4 приказан исти однос притисака који су притом добијени методом Huber - Mises - Henki. Такође, у овом случају је вредност граничног већа у односу на балистички притисак.

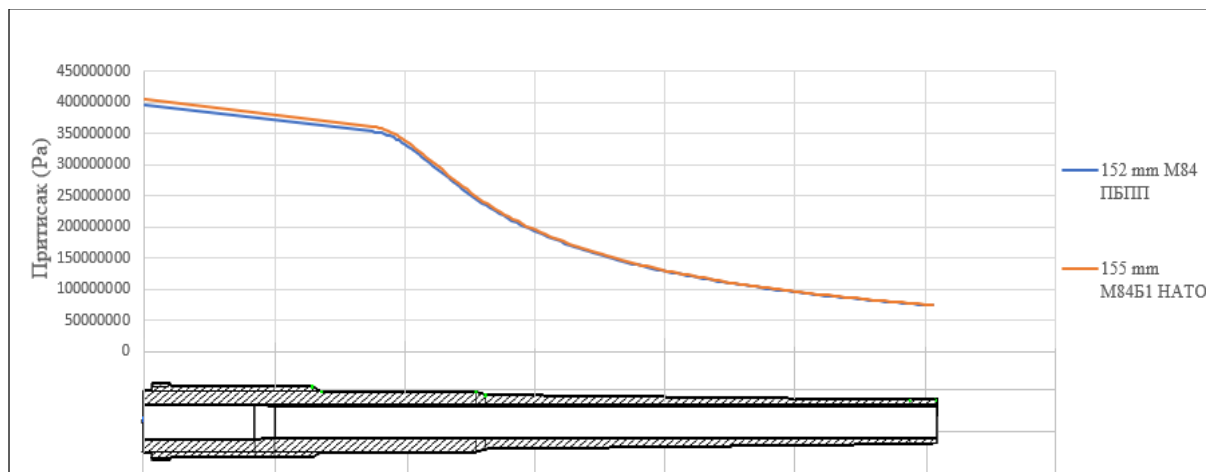
На дијаграму 3.2.5 дат је приказ промене стварног степена сигурности одређеног методом Saint - Venant. Са дијаграма се види да се вредност степена сигурности у пределу барутне коморе креће у границама од 1 до 1,47. Затим, за пресеке од почетка жљебова до пресека где се постиже највећи притисак барутних гасова, вредност степена сигурности се креће 1,53 до 1,94. Највећи притисак барутних гасова је постигнут на дужини од 1,9 m. Вредност степена сигурности на тој дужини износи, као што је већ речено 1,94. У даљем жљебљеном делу цеви, степен сигурности се креће у границама од 2 до 3,48, што значи да је цев у том делу предимензионисана. За пресеке у области уста цеви, коефицијент сигурности је највећи, и не сме бити мањи од 1,9. Са дијаграма се види да та вредност прелази 3,75.

На дијаграму 3.2.6 дат је приказ промене степена сигурности у унапред одређеним пресецима методом Huber - Mises - Henki. Поред методе Saint - Venant , прорачун отпорности цеви, извршен је и по овој методи. Најоптерећенији пресеци су, као што је већ речено јесу у пределу прелазног конуса, односно на почетку жљебљеног дела цеви. У пределу барутне коморе, коефицијент сигурности се креће у границама од 0,95 до 1, 23. Затим, вредност коефицијента сигурности у пределу од почетка жљебова до дела где се постиже максимални притисак јесте од 1,24 до 1,67. На устима цеви, степен сигурности је око 3,75.

На основу анализе резултата прорачуна може се закључити следеће: вредност коефицијената стварне сигурности цеви већа је за случај прорачуна по првој теорији отпорности цеви, у односу на другу.

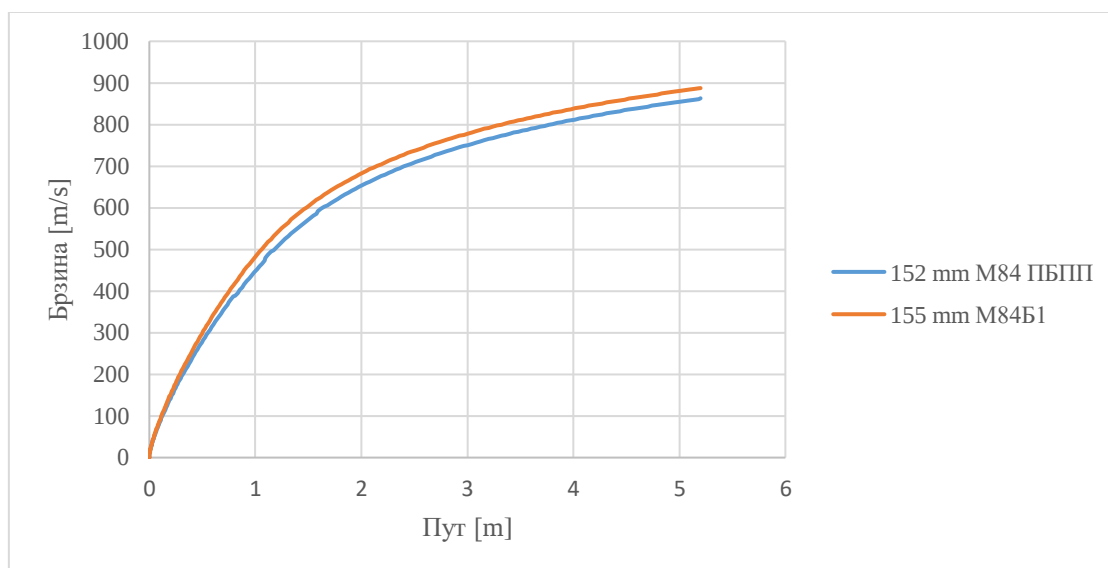
Анализом резултата прорачуна закључено је да се израчунати коефицијенти сигурности у свим карактеристичним пресецима налазе у дозвољеним границама, односно, да нису испод препоручених вредности. Најоптерећенији пресеци цеви налазе се у околини прелазног конуса, односно на почетку жљебљеног дела цеви.

У даљем делу рада извршено је поређење резултата за већ постојеће средство, односно за цев топ - хаубице 152 mm M84 и резултата добијених за конвертовану цев. Према усвојеном унутрашње - балистичком прорачуну за цев дужине 39 калибара, највећи притисак барутних гасова на затварач, за случај употребе пројектила 155 mm M101 износи 4055 bar - а. Одговарајући притисак код хаубице 152 mm M84 је 3955 bar - а, што значи да је у случају коришћења цеви 155/39 притисак већи за око 2,5%, односно да су задњак и тело затварача изложени дејству већег притиска.



Слика 3.2.2 Упоредни приказ резултата добијених УБ прорачуном за цев топ – хаубице 152 mm M84 и конвертоване цеви

На дијаграму 3.2.7 дат је приказ промене брзине за топ - хаубицу 152 mm M84 са ПБПП и промене брзине за пројектил M101. Са дијаграма се види да је максимална брзина добијена унутрашње - балистичким прорачуном за топ - хаубицу 152 mm M84 869 m/s, док је прорачуном за конвертовану цев добијена брзина од 887 m/s, што је око 2 % више.

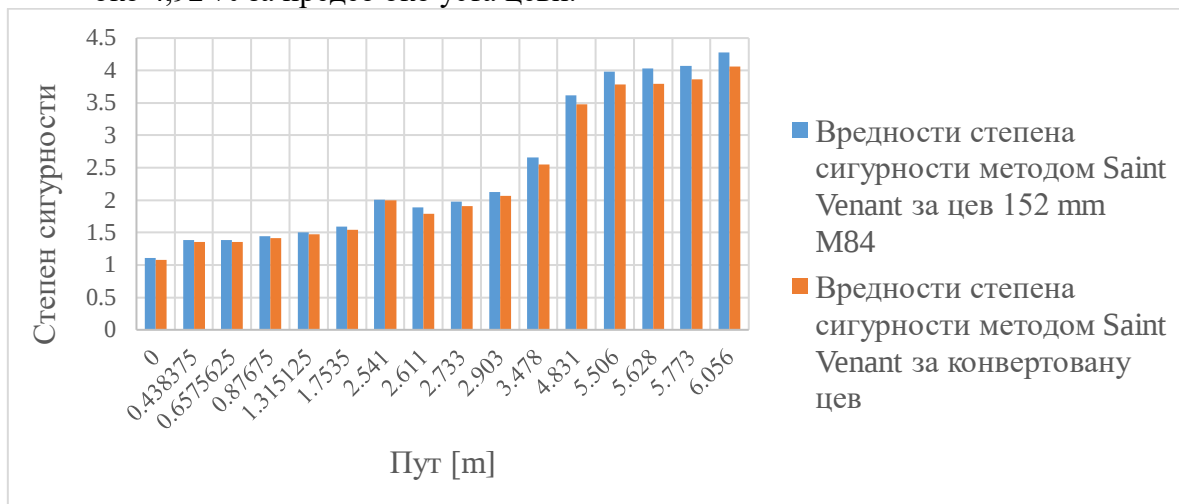


Дијаграм 3.2.7 Приказ промене брзине за топ - хаубицу 152 mm M84 са ПБПП и конвертовану цев са пројектилом M101

На дијаграму 3.2.8 приказан је однос стварног степена сигурности који је одређен методом Saint - Venant за цев топ - хаубице 152 mm M84 и конвертовану цев.

Са дијаграма се види да су вредности коефицијената за конвертовану цев мањи у односу на коефицијенте прорачунате за цев 152 mm и то за:

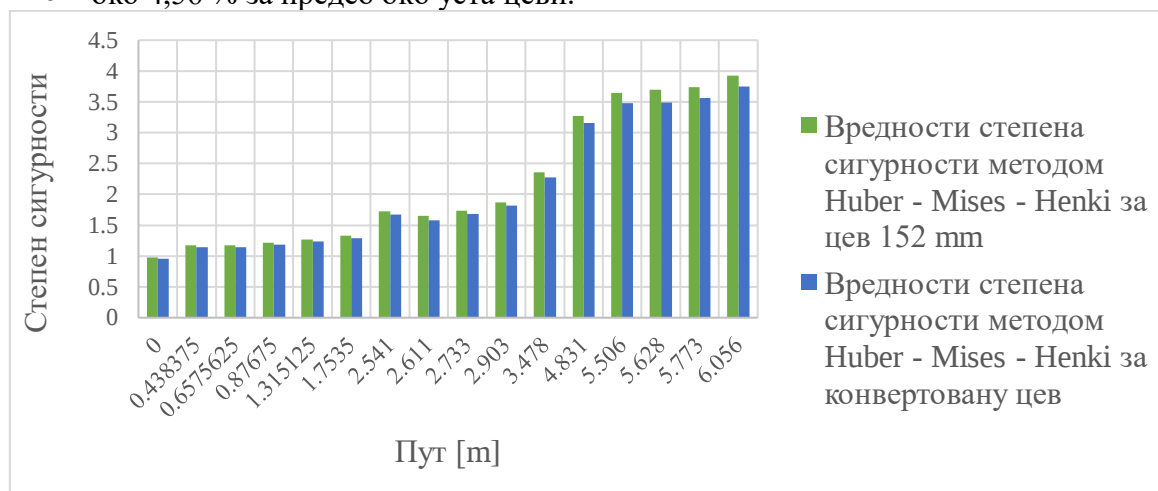
- око 2,25 % у пределу барутне коморе,
- око 1,97 % за предео где се постиже максимални притисак и
- око 4,92 % за предео око уста цеви.



Дијаграм 3.2.8 Приказ резултата вредности степена сигурности методом Saint - Venant за цев хаубице M84 152 mm и конвертоване цеви

На дијаграму 3.2.9 дат је приказ односа коефицијената прорачунатих методом Huber - Mises - Henki. Вредности степена сигурности који су добијени овом методом за конвертовану цев, се разликују од вредности степена сигурности цеви топ - хаубице M84 152 mm за:

- око 2,23 % у пределу барутне коморе,
- око 2,99 % за предео где се постиже максимални притисак и
- око 4,56 % за предео око уста цеви.



Дијаграм 3.2.9 Приказ резултата вредности степена сигурности методом Huber - Mises - Henki за цев топ - хаубице 152 mm M84 и конвертоване цеви

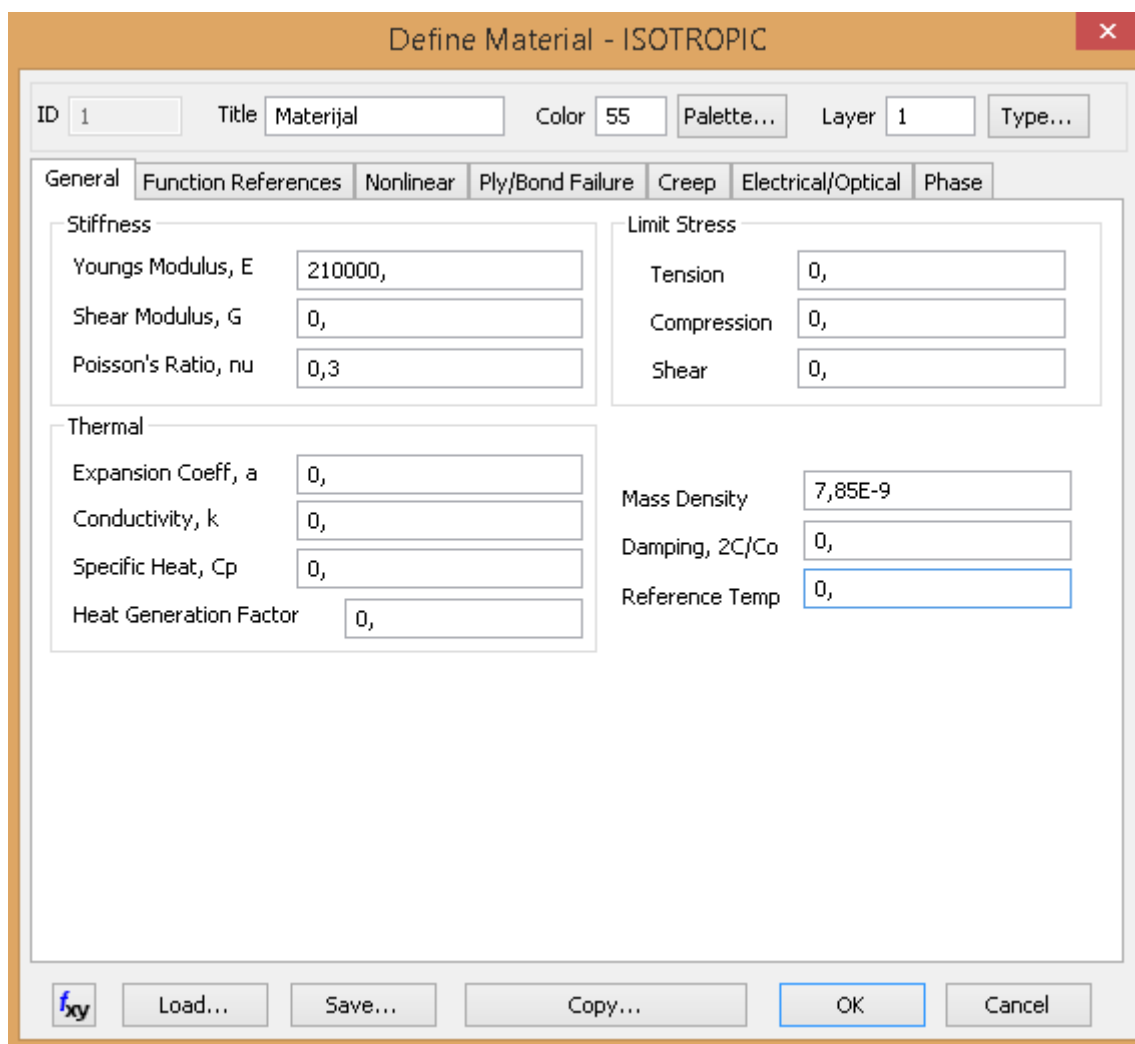
4. FEM анализа напонског стања зидова цеви

Када се говори о цеви артиљеријског оруђа, могуће је анализирати бројне параметре који делују на цев, попут утицаја преноса топлоте на промену температуре зида цеви, осцилације цеви, напрезања и деформације канала цеви услед урезивања водећег прстена у жљебове при кретању пројектила, као и многе друге.

Овај део мастер рада односи се на анализу расподеле напона који се јавља у цеви артиљеријског оруђа. Цев је потребно неким софтвером за прорачун методом коначних елемената испитати на унутрашње напоне. Проверава се вредност напона у зидовима цеви. За анализу напонског стања зидова цеви одабран је програмски пакет FEMAP, при чему су примењени следећи кораци:

1. Дефинисање својства материјала и избор типа коначног елемента

При дефинисању модела за прорачун одабран је солид базиран на одабраном материјалу. Својства одабраног материјала су приказана на слици испод.

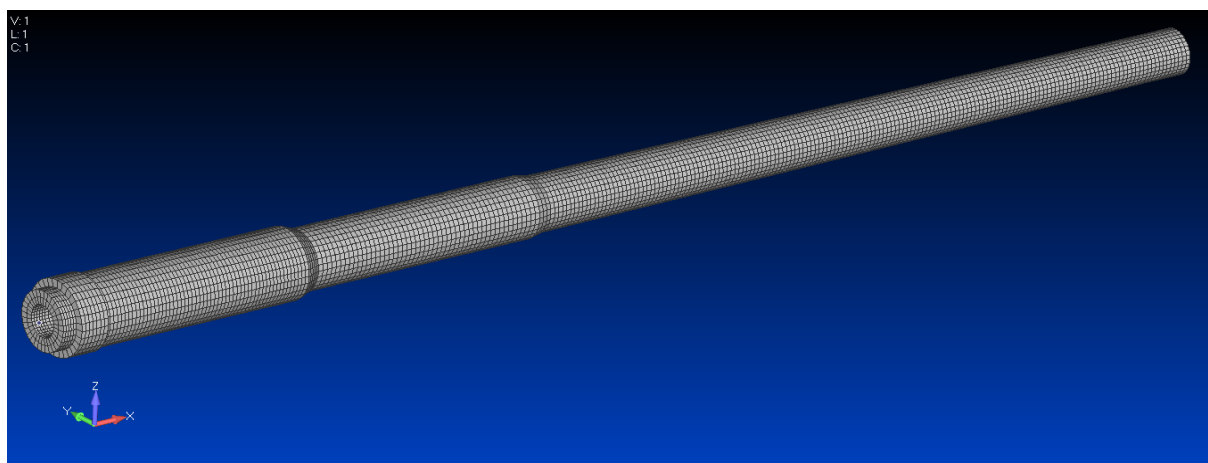


Слика 4.1 Дефинисање материјала у програмском пакету FEMAP

2. Конструисање модела цеви и дефинисање мреже коначних елемената

Поред правилне расподеле притиска и правилног дефинисања граничних услова, посебна пажња је посвећена изради мреже коначних елемената, јер она знатно утиче на квалитет прорачуна. Добро је познато да резултат израчунавања у великој мери зависи од густине мреже, тј. од величине употребљених елемената. У принципу, резултат ће се приближити тачном решењу са повећањем броја елемената.

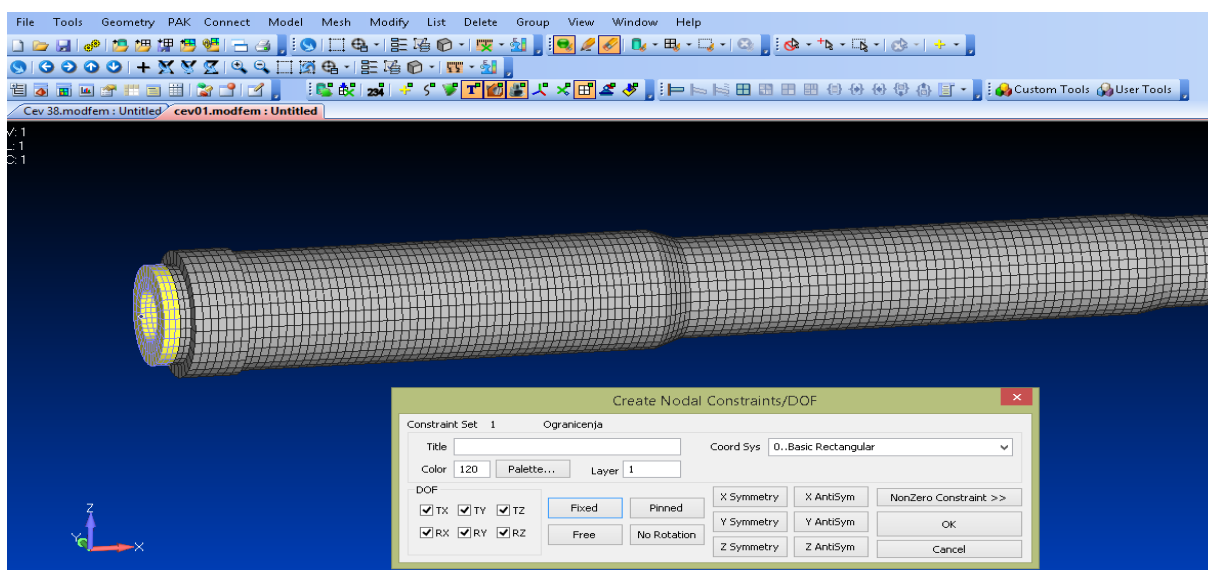
Конкретно, у овом случају, величина елемента износи 20 mm, што значи да је укупна дужина цеви подељена на око 300 сегмената. По својој дебљини зид цеви је подељен на два сегмента, док је по обиму подељен на осам. Мрежа коначних елемената, која је усвојена за прорачун садржи око 27000 елемената.



Слика 4.2 Мрежа коначних елемената конвертоване цеви

3. Задавање ограничења

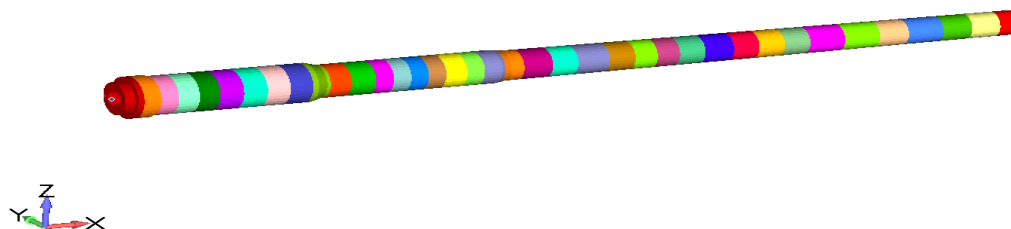
При дефинисању ограничења дно цеви је фиксирано, односно чворовима који га сачињавају су одузети свих 6 степени слободе кретања, што је приказано на слици 4.3. Ротација око z осе и транслација по аксијалном правцу су онемогућени за све чворове мреже коначних елемената.



Слика 4.3 Дефинисање ограничења цеви

4. Задавање оптерећења

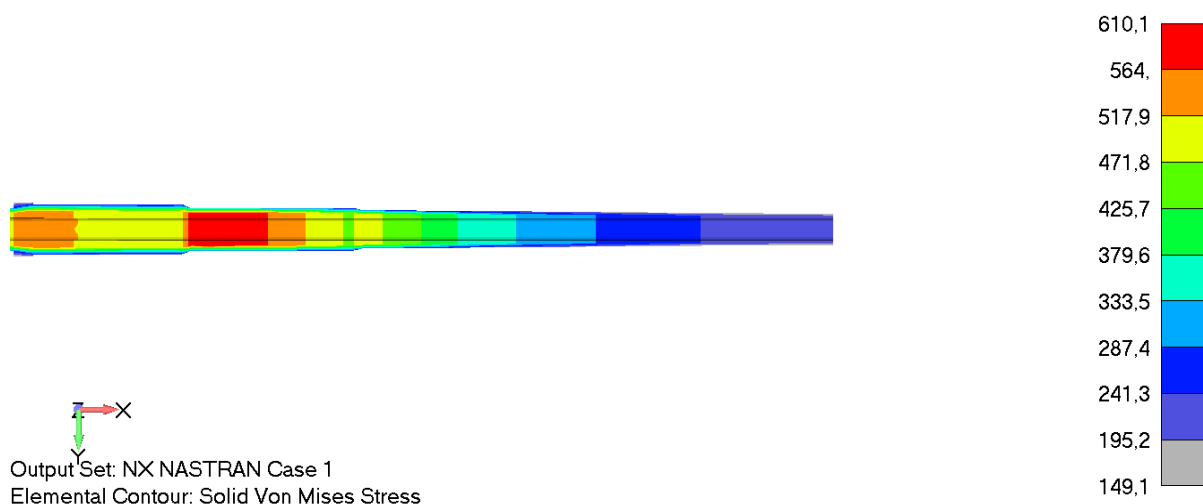
Притисак барутних гасова делује на унутрашњи зид цеви и то у подручју иза пројектила. Вредност притиска барутних гасова се мења дуж канала цеви. Према величини притиска цев се прорачунава на отпорност. При прорачуну напонског стања у овом делу раду, цев је подељена на одређени број сегмената како би у њима био дефинисан средњи притисак. На слици 4.4 дат је приказ цеви на којој се јасно види сваки од сегмената. Како притисак ни у једном тренутку времена нема исту вредност, тако је и та чињеница утицала на поступак дефинисања притиска у карактеристичним пресецима. За сваки од њих, узета је средња вредност притиска који делује на тој дужини. Ради добијања што тачнијих резултата, број пресека којима је цев подељена за анализу јесте 38.



Слика 4.4 Приказ поделе цеви за потребе дефинисања притиска

5. Анализа добијених резултата

Након завршених прорачуна, врши се учитавање и приказ добијених резултата. У овом случају, то је напон у зиду цеви који је настао као последица дејства притиска барутних гасова.



Слика 4.5 Расподела напона дуж цеви

Ради боље прегледности и лакше анализе резултата урађен је дијаграм промене напона по дужини цеви, који је приказан испод.

Граница еластичности одабраног материјала износи 1000 N/mm^2 . Ова вредност не сме да се прекорачи у току процеса опаљења ни у једном сегменту дуж цеви. Са дијаграма се уочава да је вредност максималног напона 610 N/mm^2 . Овај напон је нижи од напона течења материјала, што значи да би овако пројектована цев могла безбедно да се коритиси при опаљењу. Када се посматра облик криве, примећује се да су највећи напони у пределу барутне коморе, а да након тога њихова вредност опада.



Дијаграм 4.1 Расподела напона по дужини цеви

5. Закључак

У оквиру овог мастер рада извршен је прорачун отпорности цеви за већ постојеће средство, топ - хаубицу 152 mm M84 НОРА - А као и анализа могућности прекалибрисања цеви 152 mm у цев 155 mm и провера отпорности конвертоване цеви. Како би се проверила успешност целокупног процеса најпре је извршен унутрашње - балистички прорачун за оруђе калибра 152 mm. Прорачун је извршен са пројектилом 152 mm M90 и то са торментачним пуњењем, што би значило да барутно пуњење оваквог пројектила развија притисак који је најмање за 30 % већи од највећег номиналног притиска.

Према усвојеном унутрашње - балистичком (УБ) решењу за цев дужине 6.056 m, односно цев 152/39, највећи притисак барутних гасова на затварач, за случај употребе пројектила 152 mm M90 је 3955 bar - а, док је максимални притисак на пројектил 3527 bar - а, што је приказано на дијаграмима 3.1.1 и 3.1.2, док је целокупан излаз дат у прилогу 1.

Артиљеријска цев мора да буде довољно отпорна и са оптималном крутошћу. Сматра се да је отпорност цеви довољна ако цев после опаљења на зидовима нема заосталих деформација тј. материјал цеви мора да ради у области еластичних деформација независно од услова експлоатације (загревање цеви, промена услова пуњења итд.).

Анализа отпорности цеви извршена је на основу теорије Saint - Venant и Hubert - Mises - Henki. Применом метода се добијају вредности граничног притиска у карактеристичним пресецима. Вредности граничног притиска добијени методама представљају вредности које балистички притисак ни у једном тренутку не сме да прекорачи.

Као што је већ речено степен сигурности представља однос граничног и балистичког притиска. У случају цеви 152 mm, степен сигурности има вредности које не одступају од вредности степена сигурности дефинисаног литературом [1].

У програмском пакету CATIA моделирана је цев чија спољна траса одговара цеви 152 mm, док је унутрашња траса калибра 155 mm. За тако моделирану цев дефинисано је шеснаест карактеристичних пресека у којима су рачунате вредности граничног притиска према теорији Saint - Venant и Hubert - Mises - Henki. За конвертовану цев је извршен УБ прорачун са пројектилом 155 mm M101 са торментачним пуњењем. Према извршеном УБ прорачуну, вредност притиска на затварач 4055 bar - а, док је вредност максималног притиска на пројектил 3603 бар - а. Максимални притисак на затварач је у односу на притисак код цеви калибра 152 mm већи за око 2,5 %, док је вредност притиска на пројектил већа за око 2,1 %.

Обзиром да је притисак барутних гасова променљива величина, јасно је да он није исти у сваком попречном пресеку цеви, што доводи до тога да је и дебљина зидова различита у појединим попречним пресецима. Обзиром да је цев 152 mm прекалибрисана у цев 155 mm значи да су и самим тим зидови цеви тањи.

И поред тога да се у конвертованој цеви јавио већи максимални притисак барутних гасова, степен сигурности се налази у дозвољеним границама прописаним у литератури [1]. Степен сигурности добијен по теорији Hubert - Mises - Henki даје мање вредности у односу на степен сигурности добијен по теорији Saint Venant. Што значи да уколико би се цев пројектовала по теорији Saint - Venant добила би се већа дебљина зидова цеви, а тиме и маса цеви.

Граница еластичности материјала за цев постојећег оруђа, топ - хаубицу 152 mm М84 НОРА - А износи 1000 МПа, а FЕМ анализом је утврђено да максимална вредност напона који се јавља у зидовима цеви не прелази ову границу. Највиша вредност напона која се добија методом коначних елемената јесте 610 МПа, што значи да је цев остала у области еластичних деформација.

У погледу даљег развоја могуће је додатно смањити дебљину цеви на појединим местима која остају у подручју ниских напона током целокупног процеса опаљења. Уколико би се вршила конверзија цеви, то би значило да би жљебови цеви били плићи, па би један од могућих проблема био и урезивање пројектила. Наиме, у погледу отпорности цеви, као што је већ речено, сви степени сигурности се налазе у дозвољеним границама, док би у даљем делу било пожељно разматрање уградње такве цеви у колевку постојеће конструкције.

ПРИЛОГ 1

Унутрашње - балистички прорачун за топ - хаубицу НОРА - А М84 152 mm урађен термодинамичким моделом који је решен нумерички методом Runge - Kutta

Y	Y2	PSI	L [m]	V [m/s]	P [Pa]	Pproj [Pa]	Pzat [Pa]	T [s]
0	0	0	0	0	30000000	30000000	30000000	0
0.0525	0.0414	0.0279	0	0.5821	31597550	29230300	32781170	0.00005
0.0539	0.0425	0.0287	0.0001	1.181	32506990	30071620	33724680	0.0001
0.0554	0.0437	0.0296	0.0001	1.7971	33442230	30936780	34694950	0.00015
0.057	0.0449	0.0304	0.0002	2.4309	34403900	31826410	35692640	0.0002
0.0586	0.0462	0.0313	0.0004	3.0829	35392680	32741110	36718470	0.00025
0.0602	0.0475	0.0322	0.0005	3.7537	36409260	33681530	37773120	0.0003
0.0619	0.0488	0.0331	0.0008	4.4437	37454320	34648300	38857340	0.00035
0.0636	0.0502	0.0341	0.001	5.1536	38528570	35642070	39971820	0.0004
0.0654	0.0516	0.035	0.0013	5.8838	39632710	36663480	41117320	0.00045
0.0672	0.053	0.036	0.0016	6.6349	40767460	37713220	42294580	0.0005
0.0691	0.0545	0.0371	0.0019	7.4074	41933560	38791960	43504360	0.00055
0.0711	0.0561	0.0382	0.0023	8.2021	43131740	39900370	44747420	0.0006
0.0731	0.0576	0.0393	0.0028	9.0195	44362740	41039140	46024530	0.00065
0.0751	0.0593	0.0404	0.0032	9.8602	45627310	42208980	47336480	0.0007
0.0772	0.0609	0.0416	0.0037	10.7248	46926220	43410580	48684050	0.00075
0.0794	0.0626	0.0428	0.0043	11.6141	48260240	44644650	50068040	0.0008
0.0816	0.0644	0.044	0.0049	12.5286	49630120	45911910	51489230	0.00085
0.0839	0.0662	0.0453	0.0056	13.469	51036640	47213050	52948440	0.0009
0.0863	0.0681	0.0467	0.0062	14.4361	52480580	48548810	54446470	0.00095
0.0887	0.07	0.048	0.007	15.4305	53962710	49919900	55984120	0.001
0.0912	0.072	0.0494	0.0078	16.4529	55483830	51327060	57562210	0.00105
0.0938	0.074	0.0509	0.0086	17.5042	57044680	52770980	59181540	0.0011
0.0964	0.0761	0.0524	0.0095	18.5849	58646070	54252390	60842910	0.00115
0.0991	0.0782	0.0539	0.0105	19.696	60288760	55772020	62547140	0.0012
0.1019	0.0804	0.0555	0.0115	20.8382	61973530	57330560	64295020	0.00125
0.1048	0.0827	0.0571	0.0126	22.0123	63701140	58928740	66087340	0.0013
0.1077	0.085	0.0588	0.0137	23.219	65472350	60567250	67924900	0.00135
0.1108	0.0874	0.0605	0.0149	24.4593	67287890	62246780	69808450	0.0014
0.1139	0.0898	0.0623	0.0162	25.7339	69148530	63968020	71738780	0.00145
0.1171	0.0924	0.0642	0.0175	27.0437	71054970	65731630	73716640	0.0015
0.1204	0.095	0.0661	0.0189	28.3895	73007940	67538290	75742760	0.00155
0.1237	0.0976	0.068	0.0203	29.7723	75008110	69388610	77817860	0.0016
0.1272	0.1004	0.07	0.0218	31.1929	77056180	71283250	79942660	0.00165
0.1308	0.1032	0.0721	0.0234	32.6523	79152800	73222780	82117810	0.0017
0.1344	0.1061	0.0742	0.0251	34.1512	81298600	75207820	84343980	0.00175

0.1382	0.109	0.0764	0.0269	35.6907	83494180	77238920	86621820	0.0018
0.1421	0.1121	0.0787	0.0287	37.2717	85740130	79316600	88951890	0.00185
0.146	0.1152	0.081	0.0306	38.8952	88036990	81441380	91334790	0.0019
0.1501	0.1184	0.0834	0.0326	40.562	90385280	83613740	93771050	0.00195
0.1543	0.1217	0.0859	0.0346	42.2733	92785490	85834130	96261170	0.002
0.1586	0.1251	0.0884	0.0368	44.0298	95238060	88102960	98805610	0.00205
0.163	0.1286	0.0911	0.039	45.8327	97743360	90420570	1.01E+08	0.0021
0.1675	0.1321	0.0938	0.0414	47.6828	100301800	92787330	1.04E+08	0.00215
0.1721	0.1358	0.0966	0.0438	49.5813	102913600	95203470	1.07E+08	0.0022
0.1769	0.1395	0.0994	0.0463	51.5291	105579100	97669300	1.1E+08	0.00225
0.1818	0.1434	0.1024	0.049	53.5272	108298600	100185000	1.12E+08	0.0023
0.1868	0.1473	0.1054	0.0517	55.5766	111072000	102750700	1.15E+08	0.00235
0.1919	0.1514	0.1085	0.0545	57.6784	113899600	105366400	1.18E+08	0.0024
0.1972	0.1555	0.1117	0.0575	59.8334	116781400	108032300	1.21E+08	0.00245
0.2026	0.1598	0.1151	0.0605	62.0429	119717300	110748200	1.24E+08	0.0025
0.2081	0.1642	0.1185	0.0637	64.3077	122707200	113514100	1.27E+08	0.00255
0.2138	0.1686	0.122	0.0669	66.6288	125751000	116329900	1.3E+08	0.0026
0.2196	0.1732	0.1256	0.0703	69.0074	128848400	119195200	1.34E+08	0.00265
0.2255	0.1779	0.1293	0.0738	71.4443	131999000	122109900	1.37E+08	0.0027
0.2316	0.1827	0.1331	0.0775	73.9406	135202600	125073400	1.4E+08	0.00275
0.2379	0.1876	0.137	0.0812	76.4972	138458600	128085500	1.44E+08	0.0028
0.2443	0.1927	0.1411	0.0851	79.1151	141766400	131145500	1.47E+08	0.00285
0.2508	0.1979	0.1452	0.0892	81.7954	145125400	134252800	1.51E+08	0.0029
0.2575	0.2031	0.1495	0.0933	84.5389	148534900	137406900	1.54E+08	0.00295
0.2644	0.2085	0.1539	0.0976	87.3465	151993900	140606800	1.58E+08	0.003
0.2714	0.2141	0.1584	0.102	90.2192	155501700	143851700	1.61E+08	0.00305
0.2786	0.2197	0.163	0.1066	93.158	159057000	147140700	1.65E+08	0.0031
0.2859	0.2255	0.1678	0.1114	96.1636	162658900	150472800	1.69E+08	0.00315
0.2934	0.2315	0.1727	0.1162	99.2369	166306200	153846800	1.73E+08	0.0032
0.3011	0.2375	0.1777	0.1213	102.3788	169997400	157261400	1.76E+08	0.00325
0.3089	0.2437	0.1829	0.1265	105.59	173731200	160715500	1.8E+08	0.0033
0.3169	0.25	0.1882	0.1318	108.8714	177506000	164207500	1.84E+08	0.00335
0.3251	0.2565	0.1937	0.1374	112.2238	181320300	167736100	1.88E+08	0.0034
0.3335	0.2631	0.1993	0.1431	115.6477	185172300	171299500	1.92E+08	0.00345
0.342	0.2698	0.205	0.1489	119.144	189060200	174896100	1.96E+08	0.0035
0.3507	0.2767	0.2109	0.155	122.7132	192982100	178524200	2E+08	0.00355
0.3596	0.2837	0.217	0.1612	126.356	196936000	182181800	2.04E+08	0.0036
0.3687	0.2909	0.2232	0.1676	130.073	200919600	185867000	2.08E+08	0.00365
0.378	0.2982	0.2296	0.1742	133.8646	204930900	189577700	2.13E+08	0.0037
0.3874	0.3056	0.2361	0.181	137.7315	208967400	193311900	2.17E+08	0.00375
0.397	0.3132	0.2428	0.188	141.674	213027000	197067300	2.21E+08	0.0038
0.4069	0.321	0.2497	0.1952	145.6925	217106900	200841500	2.25E+08	0.00385

0.4169	0.3289	0.2567	0.2026	149.7874	221204700	204632300	2.29E+08	0.0039
0.427	0.3369	0.2639	0.2102	153.9591	225317600	208437100	2.34E+08	0.00395
0.4374	0.3451	0.2713	0.218	158.2077	229443000	212253500	2.38E+08	0.004
0.448	0.3534	0.2788	0.226	162.5336	233578000	216078700	2.42E+08	0.00405
0.4587	0.3619	0.2866	0.2342	166.9367	237719800	219910100	2.47E+08	0.0041
0.4697	0.3705	0.2945	0.2427	171.4173	241865300	223745100	2.51E+08	0.00415
0.4808	0.3793	0.3026	0.2514	175.9753	246011700	227580900	2.55E+08	0.0042
0.4921	0.3882	0.3109	0.2603	180.6108	250155800	231414500	2.6E+08	0.00425
0.5036	0.3973	0.3194	0.2694	185.3237	254294500	235243200	2.64E+08	0.0043
0.5153	0.4065	0.3281	0.2788	190.1139	258424700	239063900	2.68E+08	0.00435
0.5272	0.4159	0.337	0.2884	194.9811	262543200	242873800	2.72E+08	0.0044
0.5393	0.4254	0.346	0.2983	199.9251	266646700	246669900	2.77E+08	0.00445
0.5516	0.4351	0.3553	0.3084	204.9457	270731900	250449100	2.81E+08	0.0045
0.564	0.4449	0.3647	0.3188	210.0424	274795700	254208400	2.85E+08	0.00455
0.5766	0.4549	0.3744	0.3294	215.2148	278834800	257944900	2.89E+08	0.0046
0.5895	0.465	0.3843	0.3403	220.4624	282845900	261655500	2.93E+08	0.00465
0.6025	0.4753	0.3943	0.3515	225.7846	286825700	265337100	2.98E+08	0.0047
0.6156	0.4857	0.4046	0.3629	231.181	290771000	268986800	3.02E+08	0.00475
0.629	0.4962	0.415	0.3746	236.6507	294678600	272601700	3.06E+08	0.0048
0.6425	0.5069	0.4257	0.3866	242.193	298545000	276178500	3.1E+08	0.00485
0.6562	0.5177	0.4366	0.3988	247.8071	302367400	279714400	3.14E+08	0.0049
0.6701	0.5287	0.4476	0.4114	253.4923	306142500	283206700	3.18E+08	0.00495
0.6842	0.5397	0.4589	0.4242	259.2475	309867100	286652300	3.21E+08	0.005
0.6984	0.551	0.4704	0.4373	265.0718	313538400	290048500	3.25E+08	0.00505
0.7128	0.5623	0.4821	0.4507	270.9642	317153300	293392600	3.29E+08	0.0051
0.7274	0.5738	0.494	0.4644	276.9236	320709000	296681900	3.33E+08	0.00515
0.7421	0.5854	0.5061	0.4784	282.9489	324202400	299913700	3.36E+08	0.0052
0.7569	0.5971	0.5184	0.4927	289.0388	327631200	303085500	3.4E+08	0.00525
0.772	0.609	0.5309	0.5073	295.1922	330992300	306194800	3.43E+08	0.0053
0.7871	0.621	0.5436	0.5222	301.4077	334283500	309239400	3.47E+08	0.00535
0.8025	0.6331	0.5565	0.5374	307.6841	337502100	312217000	3.5E+08	0.0054
0.8179	0.6453	0.5696	0.553	314.0198	340645900	315125200	3.53E+08	0.00545
0.8336	0.6576	0.5829	0.5688	320.4137	343712600	317962100	3.57E+08	0.0055
0.8493	0.67	0.5963	0.585	326.864	346700000	320725800	3.6E+08	0.00555
0.8652	0.6826	0.61	0.6015	333.3695	349606300	323414300	3.63E+08	0.0056
0.8812	0.6952	0.6239	0.6183	339.9285	352429400	326025900	3.66E+08	0.00565
0.8974	0.7079	0.638	0.6355	346.5394	355167600	328558900	3.68E+08	0.0057
0.9136	0.7208	0.6522	0.653	353.2007	357819200	331011900	3.71E+08	0.00575
0.93	0.7337	0.6666	0.6708	359.9107	360382800	333383400	3.74E+08	0.0058
0.9465	0.7467	0.6812	0.689	366.6678	362857000	335672200	3.76E+08	0.00585
0.9631	0.7598	0.696	0.7075	373.4703	365240500	337877200	3.79E+08	0.0059
0.9799	0.773	0.711	0.7263	380.3164	367532100	339997200	3.81E+08	0.00595

0.9967	0.7863	0.7261	0.7455	387.2046	369731100	342031400	3.84E+08	0.006
1	0.7889	0.7276	0.7493	388.563	369224600	341562800	3.83E+08	0.00601
1.0169	0.8022	0.7446	0.7689	395.4924	372385900	344487300	3.86E+08	0.00606
1.034	0.8157	0.7613	0.7889	402.4763	375067600	346968100	3.89E+08	0.00611
1.0511	0.8292	0.7775	0.8092	409.5058	377266200	349001900	3.91E+08	0.00616
1.0684	0.8429	0.7931	0.8298	416.5719	378981200	350588400	3.93E+08	0.00621
1.0857	0.8565	0.8083	0.8508	423.6655	380215200	351730000	3.94E+08	0.00626
1.1031	0.8702	0.8229	0.8722	430.7777	380973600	352431600	3.95E+08	0.00631
1.1205	0.8839	0.837	0.8939	437.8997	381264700	352700900	3.96E+08	0.00636
1.1379	0.8977	0.8505	0.916	445.0229	381099000	352547600	3.95E+08	0.00641
1.1553	0.9114	0.8634	0.9384	452.1388	380489600	351983900	3.95E+08	0.00646
1.1726	0.9251	0.8757	0.9612	459.2393	379451800	351023800	3.94E+08	0.00651
1.1899	0.9387	0.8873	0.9843	466.3165	378002500	349683100	3.92E+08	0.00656
1.2071	0.9523	0.8984	1.0078	473.363	376160400	347979000	3.9E+08	0.00661
1.2242	0.9658	0.9088	1.0317	480.3715	373945500	345930000	3.88E+08	0.00666
1.2412	0.9792	0.9186	1.0559	487.3353	371378800	343555600	3.85E+08	0.00671
1.2581	0.9925	0.9278	1.0804	494.248	368482300	340876100	3.82E+08	0.00676
1.2676	1	0.9327	1.0945	498.1363	366704900	339231900	3.8E+08	0.006788
1.2843	1	0.9409	1.1195	504.9568	363290700	336073400	3.77E+08	0.006838
1.3008	1	0.9485	1.145	511.711	359606600	332665400	3.73E+08	0.006888
1.3171	1	0.9555	1.1707	518.3939	355675600	329028900	3.69E+08	0.006938
1.3332	1	0.9619	1.1968	525.0013	351520600	325185200	3.65E+08	0.006988
1.3492	1	0.9678	1.2232	531.5292	347163900	321154900	3.6E+08	0.007038
1.3649	1	0.9731	1.2499	537.9739	342627400	316958200	3.55E+08	0.007088
1.3804	1	0.9779	1.277	544.3323	337932300	312614800	3.51E+08	0.007138
1.3957	1	0.9821	1.3044	550.6017	333099000	308143700	3.46E+08	0.007188
1.4108	1	0.9858	1.3321	556.7797	328147000	303562700	3.4E+08	0.007238
1.4257	1	0.9891	1.3601	562.8641	323095100	298889300	3.35E+08	0.007288
1.4403	1	0.9919	1.3883	568.8534	317960900	294139700	3.3E+08	0.007338
1.4547	1	0.9942	1.4169	574.7461	312761000	289329400	3.24E+08	0.007388
1.4689	1	0.9961	1.4458	580.5411	307511100	284472800	3.19E+08	0.007438
1.4828	1	0.9976	1.475	586.2377	302225800	279583400	3.14E+08	0.007488
1.4964	1	0.9987	1.5044	591.8353	296918500	274673800	3.08E+08	0.007538
1.5099	1	0.9995	1.5342	597.3337	291601900	269755500	3.03E+08	0.007588
1.5231	1	0.9999	1.5642	602.7327	286287500	264839300	2.97E+08	0.007638
1.532	1	1	1.585	606.3957	282631800	261457400	2.93E+08	0.007673
1.532	1	1	1.6155	611.6277	277401500	256618900	2.88E+08	0.007723
1.532	1	1	1.6462	616.7632	272303600	251903000	2.83E+08	0.007773
1.532	1	1	1.6771	621.8046	267334700	247306300	2.77E+08	0.007823
1.532	1	1	1.7083	626.7544	262491400	242825900	2.72E+08	0.007873
1.532	1	1	1.7398	631.6148	257770400	238458600	2.67E+08	0.007923
1.532	1	1	1.7715	636.3881	253168400	234201400	2.63E+08	0.007973

1.532	1	1	1.8034	641.0765	248682100	230051200	2.58E+08	0.008023
1.532	1	1	1.8356	645.6822	244308300	226005100	2.53E+08	0.008073
1.532	1	1	1.868	650.2072	240044000	222060200	2.49E+08	0.008123
1.532	1	1	1.9006	654.6534	235886000	218213800	2.45E+08	0.008173
1.532	1	1	1.9335	659.023	231831500	214463000	2.41E+08	0.008223
1.532	1	1	1.9665	663.3177	227877300	210805100	2.36E+08	0.008273
1.532	1	1	1.9998	667.5395	224020800	207237500	2.32E+08	0.008323
1.532	1	1	2.0333	671.6901	220259200	203757600	2.29E+08	0.008373
1.532	1	1	2.067	675.7712	216589600	200363000	2.25E+08	0.008423
1.532	1	1	2.1009	679.7847	213009600	197051200	2.21E+08	0.008473
1.532	1	1	2.135	683.7321	209516400	193819800	2.17E+08	0.008523
1.532	1	1	2.1692	687.6149	206107700	190666400	2.14E+08	0.008573
1.532	1	1	2.2037	691.4349	202781000	187589000	2.1E+08	0.008623
1.532	1	1	2.2384	695.1934	199534000	184585200	2.07E+08	0.008673
1.532	1	1	2.2732	698.892	196364300	181653000	2.04E+08	0.008723
1.532	1	1	2.3083	702.5321	193269700	178790300	2.01E+08	0.008773
1.532	1	1	2.3435	706.1151	190248200	175995100	1.97E+08	0.008823
1.532	1	1	2.3789	709.6422	187297500	173265400	1.94E+08	0.008873
1.532	1	1	2.4144	713.1149	184415600	170599500	1.91E+08	0.008923
1.532	1	1	2.4502	716.5343	181600700	167995400	1.88E+08	0.008973
1.532	1	1	2.4861	719.9017	178850700	165451500	1.86E+08	0.009023
1.532	1	1	2.5222	723.2184	176163800	162965900	1.83E+08	0.009073
1.532	1	1	2.5584	726.4854	173538300	160537000	1.8E+08	0.009123
1.532	1	1	2.5948	729.704	170972400	158163300	1.77E+08	0.009173
1.532	1	1	2.6314	732.8751	168464300	155843200	1.75E+08	0.009223
1.532	1	1	2.6681	735.9999	166012500	153575100	1.72E+08	0.009273
1.532	1	1	2.705	739.0795	163615400	151357600	1.7E+08	0.009323
1.532	1	1	2.742	742.1147	161271500	149189200	1.67E+08	0.009373
1.532	1	1	2.7792	745.1066	158979200	147068700	1.65E+08	0.009423
1.532	1	1	2.8165	748.0561	156737100	144994600	1.63E+08	0.009473
1.532	1	1	2.854	750.9642	154543900	142965700	1.6E+08	0.009523
1.532	1	1	2.8916	753.8317	152398200	140980700	1.58E+08	0.009573
1.532	1	1	2.9294	756.6596	150298600	139038500	1.56E+08	0.009623
1.532	1	1	2.9673	759.4487	148244000	137137800	1.54E+08	0.009673
1.532	1	1	3.0053	762.1998	146233000	135277500	1.52E+08	0.009723
1.532	1	1	3.0435	764.9138	144264600	133456500	1.5E+08	0.009773
1.532	1	1	3.0818	767.5913	142337400	131673700	1.48E+08	0.009823
1.532	1	1	3.1203	770.2332	140450500	129928200	1.46E+08	0.009873
1.532	1	1	3.1588	772.8403	138602800	128218900	1.44E+08	0.009923
1.532	1	1	3.1976	775.4131	136793100	126544800	1.42E+08	0.009973
1.532	1	1	3.2364	777.9525	135020600	124905000	1.4E+08	0.010023
1.532	1	1	3.2753	780.4591	133284100	123298700	1.38E+08	0.010073

1.532	1	1	3.3144	782.9336	131582800	121724800	1.37E+08	0.010123
1.532	1	1	3.3536	785.3766	129915700	120182600	1.35E+08	0.010173
1.532	1	1	3.393	787.7888	128282000	118671300	1.33E+08	0.010223
1.532	1	1	3.4324	790.1708	126680700	117190000	1.31E+08	0.010273
1.532	1	1	3.472	792.5231	125111000	115737900	1.3E+08	0.010323
1.532	1	1	3.5117	794.8464	123572200	114314300	1.28E+08	0.010373
1.532	1	1	3.5515	797.1413	122063400	112918600	1.27E+08	0.010423
1.532	1	1	3.5914	799.4082	120583800	111549800	1.25E+08	0.010473
1.532	1	1	3.6314	801.6478	119132800	110207500	1.24E+08	0.010523
1.532	1	1	3.6715	803.8605	117709500	108890900	1.22E+08	0.010573
1.532	1	1	3.7118	806.0468	116313300	107599300	1.21E+08	0.010623
1.532	1	1	3.7522	808.2073	114943600	106332100	1.19E+08	0.010673
1.532	1	1	3.7926	810.3425	113599500	105088800	1.18E+08	0.010723
1.532	1	1	3.8332	812.4528	112280700	103868800	1.16E+08	0.010773
1.532	1	1	3.8739	814.5386	110986300	102671300	1.15E+08	0.010823
1.532	1	1	3.9146	816.6005	109715800	101496000	1.14E+08	0.010873
1.532	1	1	3.9555	818.6389	108468600	100342300	1.13E+08	0.010923
1.532	1	1	3.9965	820.6542	107244200	99209620	1.11E+08	0.010973
1.532	1	1	4.0376	822.6468	106042000	98097480	1.1E+08	0.011023
1.532	1	1	4.0788	824.6171	104861400	97005370	1.09E+08	0.011073
1.532	1	1	4.12	826.5656	103702000	95932830	1.08E+08	0.011123
1.532	1	1	4.1614	828.4926	102563300	94879390	1.06E+08	0.011173
1.532	1	1	4.2029	830.3986	101444700	93844610	1.05E+08	0.011223
1.532	1	1	4.2445	832.2838	100345800	92828020	1.04E+08	0.011273
1.532	1	1	4.2861	834.1486	99266100	91829220	1.03E+08	0.011323
1.532	1	1	4.3279	835.9935	98205190	90847800	1.02E+08	0.011373
1.532	1	1	4.3697	837.8187	97162620	89883330	1.01E+08	0.011423
1.532	1	1	4.4117	839.6246	96137970	88935450	99739220	0.011473
1.532	1	1	4.4537	841.4115	95130820	88003750	98694350	0.011523
1.532	1	1	4.4958	843.1797	94140780	87087890	97667230	0.011573
1.532	1	1	4.538	844.9297	93167460	86187480	96657440	0.011623
1.532	1	1	4.5803	846.6616	92210470	85302190	95664610	0.011673
1.532	1	1	4.6227	848.3757	91269460	84431690	94688350	0.011723
1.532	1	1	4.6651	850.0724	90344070	83575620	93728300	0.011773
1.532	1	1	4.7077	851.752	89433940	82733680	92784070	0.011823
1.532	1	1	4.7503	853.4147	88538750	81905550	91855350	0.011873
1.532	1	1	4.793	855.0609	87658170	81090940	90941780	0.011923
1.532	1	1	4.8358	856.6907	86791860	80289540	90043020	0.011973
1.532	1	1	4.8787	858.3044	85939520	79501060	89158750	0.012023
1.532	1	1	4.9216	859.9024	85100850	78725220	88288660	0.012073
1.532	1	1	4.9647	861.4848	84275550	77961750	87432460	0.012123
1.532	1	1	5.0078	863.0519	83463330	77210380	86589810	0.012173

1.532	1	1	5.051	864.6039	82663920	76470860	85760450	0.012223
1.532	1	1	5.0942	866.1412	81877050	75742940	84944100	0.012273
1.532	1	1	5.1376	867.6638	81102450	75026370	84140490	0.012323
1.532	1	1	5.181	869.1721	80339850	74320900	83349320	0.012373
1.532	1	1	5.2	869.826	80010660	74016380	83007810	0.012394

ПРИЛОГ 2

Унутрашње - балистички прорачун за конвертовану цев 155 mm
урађен термодинамичким моделом који је решен нумерички методом
Runge - Kutta

Y	Y2	PSI	L [m]	V [m/s]	P [Pa]	Pproj [Pa]	Pzat [Pa]	T [s]
0	0	0	0	0	30000000	30000000	30000000	0
0.0506	0.0399	0.0269	0	0.5951	31603760	29163790	32823750	0.00005
0.052	0.0411	0.0277	0.0001	1.2079	32547210	30034390	33803610	0.0001
0.0535	0.0422	0.0285	0.0001	1.8391	33518400	30930600	34812290	0.00015
0.0551	0.0435	0.0294	0.0002	2.489	34518070	31853100	35850560	0.0002
0.0567	0.0447	0.0303	0.0004	3.1584	35546980	32802570	36919190	0.00025
0.0583	0.046	0.0312	0.0006	3.8477	36605880	33779720	38018970	0.0003
0.06	0.0474	0.0321	0.0008	4.5575	37695560	34785270	39150710	0.00035
0.0618	0.0487	0.033	0.001	5.2884	38816790	35819930	40315220	0.0004
0.0636	0.0502	0.034	0.0013	6.0411	39970380	36884460	41513340	0.00045
0.0654	0.0516	0.0351	0.0016	6.8161	41157120	37979580	42745900	0.0005
0.0673	0.0531	0.0361	0.002	7.6141	42377860	39106060	44013750	0.00055
0.0693	0.0547	0.0372	0.0024	8.4358	43633400	40264670	45317760	0.0006
0.0713	0.0563	0.0383	0.0028	9.2818	44924580	41456170	46658780	0.00065
0.0734	0.0579	0.0395	0.0033	10.1529	46252270	42681350	48037730	0.0007
0.0755	0.0596	0.0407	0.0038	11.0496	47617310	43941010	49455460	0.00075
0.0777	0.0613	0.0419	0.0044	11.9728	49020560	45235920	50912880	0.0008
0.08	0.0631	0.0431	0.005	12.9232	50462900	46566900	52410900	0.00085
0.0824	0.065	0.0445	0.0057	13.9015	51945180	47934740	53950400	0.0009
0.0848	0.0669	0.0458	0.0064	14.9086	53468280	49340250	55532300	0.00095
0.0872	0.0688	0.0472	0.0072	15.9451	55033100	50784260	57157520	0.001
0.0898	0.0708	0.0486	0.008	17.012	56640490	52267550	58826960	0.00105
0.0924	0.0729	0.0501	0.0089	18.1099	58291340	53790940	60541530	0.0011
0.0951	0.075	0.0516	0.0098	19.2399	59986530	55355260	62302160	0.00115
0.0979	0.0772	0.0532	0.0108	20.4026	61726920	56961280	64109740	0.0012
0.1007	0.0795	0.0548	0.0119	21.5991	63513390	58609830	65965180	0.00125
0.1037	0.0818	0.0565	0.013	22.8301	65346810	60301690	67869370	0.0013
0.1067	0.0842	0.0582	0.0142	24.0966	67228010	62037660	69823180	0.00135
0.1098	0.0866	0.06	0.0154	25.3996	69157820	63818480	71827500	0.0014
0.113	0.0892	0.0618	0.0167	26.7399	71137110	65644960	73883190	0.00145
0.1163	0.0918	0.0637	0.0181	28.1184	73166660	67517820	75991090	0.0015
0.1197	0.0944	0.0657	0.0195	29.5363	75247280	69437800	78152020	0.00155
0.1232	0.0972	0.0677	0.021	30.9944	77379720	71405600	80366780	0.0016
0.1268	0.1	0.0698	0.0226	32.4937	79564740	73421930	82636150	0.00165
0.1304	0.1029	0.0719	0.0243	34.0353	81803100	75487470	84960910	0.0017
0.1342	0.1059	0.0741	0.026	35.6202	84095430	77602820	87341740	0.00175

0.1381	0.109	0.0764	0.0278	37.2494	86442460	79768650	89779360	0.0018
0.1421	0.1121	0.0787	0.0297	38.924	88844780	81985500	92274420	0.00185
0.1462	0.1154	0.0811	0.0317	40.645	91303020	84253940	94827550	0.0019
0.1504	0.1187	0.0836	0.0338	42.4135	93817700	86574480	97439300	0.00195
0.1548	0.1221	0.0862	0.036	44.2306	96389340	88947580	1E+08	0.002
0.1592	0.1256	0.0888	0.0382	46.0975	99018400	91373660	1.03E+08	0.00205
0.1638	0.1292	0.0916	0.0406	48.015	1.02E+08	93853140	1.06E+08	0.0021
0.1685	0.1329	0.0944	0.043	49.9845	1.04E+08	96386300	1.08E+08	0.00215
0.1734	0.1368	0.0973	0.0456	52.007	1.07E+08	98973460	1.11E+08	0.0022
0.1783	0.1407	0.1003	0.0482	54.0837	1.1E+08	101614800	1.14E+08	0.00225
0.1834	0.1447	0.1034	0.051	56.2155	1.13E+08	104310500	1.17E+08	0.0023
0.1886	0.1488	0.1065	0.0539	58.4038	1.16E+08	107060700	1.2E+08	0.00235
0.194	0.153	0.1098	0.0568	60.6496	1.19E+08	109865400	1.24E+08	0.0024
0.1995	0.1574	0.1132	0.0599	62.954	1.22E+08	112724500	1.27E+08	0.00245
0.2051	0.1618	0.1166	0.0631	65.3182	1.25E+08	115638000	1.3E+08	0.0025
0.2109	0.1664	0.1202	0.0665	67.7433	1.29E+08	118605600	1.33E+08	0.00255
0.2169	0.1711	0.1239	0.0699	70.2303	1.32E+08	121627100	1.37E+08	0.0026
0.223	0.1759	0.1277	0.0735	72.7805	1.35E+08	124702100	1.4E+08	0.00265
0.2292	0.1808	0.1316	0.0772	75.395	1.39E+08	127830200	1.44E+08	0.0027
0.2356	0.1859	0.1356	0.081	78.0747	1.42E+08	131011000	1.47E+08	0.00275
0.2422	0.191	0.1398	0.085	80.8208	1.45E+08	134243600	1.51E+08	0.0028
0.2489	0.1963	0.144	0.0891	83.6344	1.49E+08	137527600	1.55E+08	0.00285
0.2558	0.2018	0.1484	0.0934	86.5166	1.53E+08	140861900	1.59E+08	0.0029
0.2628	0.2073	0.1529	0.0978	89.4683	1.56E+08	144245800	1.62E+08	0.00295
0.27	0.213	0.1575	0.1023	92.4905	1.6E+08	147678200	1.66E+08	0.003
0.2774	0.2189	0.1623	0.107	95.5843	1.64E+08	151158100	1.7E+08	0.00305
0.285	0.2248	0.1672	0.1119	98.7507	1.68E+08	154684100	1.74E+08	0.0031
0.2927	0.2309	0.1723	0.1169	101.991	1.71E+08	158255000	1.78E+08	0.00315
0.3006	0.2372	0.1775	0.1221	105.305	1.75E+08	161869400	1.82E+08	0.0032
0.3087	0.2436	0.1828	0.1274	108.694	1.79E+08	165525700	1.86E+08	0.00325
0.317	0.2501	0.1883	0.1329	112.16	1.83E+08	169222200	1.9E+08	0.0033
0.3255	0.2568	0.1939	0.1386	115.703	1.87E+08	172957200	1.95E+08	0.00335
0.3341	0.2636	0.1997	0.1445	119.323	1.92E+08	176728900	1.99E+08	0.0034
0.343	0.2706	0.2057	0.1506	123.022	1.96E+08	180535300	2.03E+08	0.00345
0.352	0.2777	0.2118	0.1568	126.8	2E+08	184374300	2.08E+08	0.0035
0.3612	0.2849	0.218	0.1632	130.657	2.04E+08	188243600	2.12E+08	0.00355
0.3706	0.2924	0.2245	0.1699	134.595	2.08E+08	192141200	2.16E+08	0.0036
0.3802	0.2999	0.2311	0.1767	138.615	2.12E+08	196064400	2.21E+08	0.00365
0.39	0.3077	0.2379	0.1837	142.715	2.17E+08	200010900	2.25E+08	0.0037
0.4	0.3155	0.2448	0.191	146.898	2.21E+08	203978100	2.3E+08	0.00375
0.4102	0.3236	0.252	0.1984	151.163	2.25E+08	207963300	2.34E+08	0.0038
0.4205	0.3318	0.2593	0.2061	155.51	2.3E+08	211963600	2.39E+08	0.00385

0.4311	0.3401	0.2668	0.214	159.941	2.34E+08	215976400	2.43E+08	0.0039
0.4419	0.3486	0.2745	0.2221	164.454	2.38E+08	219998600	2.48E+08	0.00395
0.4529	0.3573	0.2824	0.2304	169.051	2.43E+08	224027200	2.52E+08	0.004
0.4641	0.3661	0.2904	0.239	173.732	2.47E+08	228059300	2.57E+08	0.00405
0.4754	0.3751	0.2987	0.2478	178.496	2.52E+08	232091500	2.61E+08	0.0041
0.487	0.3842	0.3072	0.2569	183.343	2.56E+08	236120800	2.66E+08	0.00415
0.4988	0.3935	0.3158	0.2661	188.274	2.6E+08	240143800	2.7E+08	0.0042
0.5108	0.4029	0.3247	0.2757	193.288	2.65E+08	244157400	2.75E+08	0.00425
0.5229	0.4125	0.3338	0.2855	198.385	2.69E+08	248158100	2.79E+08	0.0043
0.5353	0.4223	0.343	0.2955	203.565	2.73E+08	252142700	2.84E+08	0.00435
0.5479	0.4322	0.3525	0.3058	208.827	2.78E+08	256107600	2.88E+08	0.0044
0.5606	0.4423	0.3622	0.3164	214.171	2.82E+08	260049600	2.93E+08	0.00445
0.5736	0.4525	0.3721	0.3273	219.596	2.86E+08	263965200	2.97E+08	0.0045
0.5868	0.4629	0.3822	0.3384	225.102	2.9E+08	267851100	3.01E+08	0.00455
0.6001	0.4734	0.3925	0.3498	230.689	2.94E+08	271703800	3.06E+08	0.0046
0.6136	0.4841	0.403	0.3614	236.354	2.99E+08	275520000	3.1E+08	0.00465
0.6273	0.4949	0.4137	0.3734	242.098	3.03E+08	279296300	3.14E+08	0.0047
0.6412	0.5059	0.4247	0.3856	247.92	3.07E+08	283029300	3.19E+08	0.00475
0.6553	0.517	0.4358	0.3982	253.819	3.11E+08	286715900	3.23E+08	0.0048
0.6696	0.5282	0.4472	0.411	259.794	3.15E+08	290352800	3.27E+08	0.00485
0.684	0.5396	0.4588	0.4242	265.843	3.19E+08	293936800	3.31E+08	0.0049
0.6987	0.5512	0.4706	0.4376	271.966	3.22E+08	297464900	3.35E+08	0.00495
0.7135	0.5628	0.4826	0.4514	278.161	3.26E+08	300934000	3.39E+08	0.005
0.7284	0.5747	0.4949	0.4654	284.428	3.3E+08	304341100	3.43E+08	0.00505
0.7436	0.5866	0.5073	0.4798	290.765	3.33E+08	307683500	3.46E+08	0.0051
0.7589	0.5987	0.52	0.4945	297.17	3.37E+08	310958200	3.5E+08	0.00515
0.7743	0.6109	0.5328	0.5095	303.642	3.4E+08	314162900	3.54E+08	0.0052
0.7899	0.6232	0.5459	0.5249	310.179	3.44E+08	317294700	3.57E+08	0.00525
0.8057	0.6356	0.5592	0.5406	316.781	3.47E+08	320351200	3.61E+08	0.0053
0.8216	0.6482	0.5727	0.5566	323.445	3.5E+08	323330300	3.64E+08	0.00535
0.8377	0.6608	0.5864	0.5729	330.171	3.54E+08	326229600	3.67E+08	0.0054
0.8539	0.6736	0.6003	0.5896	336.955	3.57E+08	329047100	3.7E+08	0.00545
0.8702	0.6865	0.6144	0.6066	343.797	3.6E+08	331780900	3.73E+08	0.0055
0.8867	0.6995	0.6287	0.624	350.694	3.62E+08	334429000	3.76E+08	0.00555
0.9033	0.7126	0.6431	0.6417	357.646	3.65E+08	336989900	3.79E+08	0.0056
0.92	0.7258	0.6578	0.6597	364.649	3.68E+08	339462000	3.82E+08	0.00565
0.9369	0.7391	0.6727	0.6781	371.703	3.7E+08	341843900	3.85E+08	0.0057
0.9538	0.7525	0.6877	0.6969	378.805	3.73E+08	344134400	3.87E+08	0.00575
0.9709	0.7659	0.7029	0.716	385.954	3.75E+08	346332300	3.9E+08	0.0058
0.9881	0.7795	0.7183	0.7355	393.147	3.78E+08	348436800	3.92E+08	0.00585
1	0.7889	0.7291	0.7491	398.136	3.79E+08	349834100	3.94E+08	0.00588
1.0174	0.8026	0.7465	0.7692	405.411	3.82E+08	352771600	3.97E+08	0.00593

1.0349	0.8164	0.7634	0.7897	412.742	3.85E+08	355230700	4E+08	0.00598
1.0525	0.8303	0.7799	0.8105	420.119	3.87E+08	357206800	4.02E+08	0.00603
1.0702	0.8443	0.7959	0.8317	427.532	3.89E+08	358700900	4.04E+08	0.00608
1.088	0.8583	0.8113	0.8533	434.971	3.9E+08	359716500	4.05E+08	0.00613
1.1058	0.8723	0.8261	0.8752	442.425	3.9E+08	360260500	4.05E+08	0.00618
1.1236	0.8864	0.8403	0.8975	449.887	3.9E+08	360342400	4.06E+08	0.00623
1.1414	0.9004	0.854	0.9202	457.345	3.9E+08	359974300	4.05E+08	0.00628
1.1592	0.9145	0.8669	0.9432	464.791	3.89E+08	359170800	4.04E+08	0.00633
1.1769	0.9285	0.8793	0.9667	472.216	3.88E+08	357948500	4.03E+08	0.00638
1.1946	0.9424	0.891	0.9905	479.612	3.86E+08	356325700	4.01E+08	0.00643
1.2122	0.9563	0.9021	1.0146	486.97	3.84E+08	354322600	3.99E+08	0.00648
1.2296	0.97	0.9125	1.0392	494.283	3.81E+08	351960300	3.96E+08	0.00653
1.247	0.9837	0.9222	1.064	501.543	3.78E+08	349261100	3.93E+08	0.00658
1.2642	0.9973	0.9313	1.0893	508.745	3.75E+08	346247700	3.9E+08	0.00663
1.2676	1	0.9331	1.0944	510.189	3.75E+08	345604100	3.89E+08	0.00665
1.2846	1	0.9414	1.1201	517.311	3.71E+08	342201000	3.85E+08	0.0067
1.3014	1	0.9491	1.1462	524.359	3.67E+08	338537200	3.81E+08	0.00675
1.3181	1	0.9562	1.1726	531.329	3.63E+08	334636300	3.77E+08	0.0068
1.3345	1	0.9627	1.1993	538.215	3.58E+08	330521300	3.72E+08	0.00685
1.3508	1	0.9685	1.2264	545.015	3.54E+08	326215200	3.67E+08	0.0069
1.3668	1	0.9739	1.2538	551.724	3.49E+08	321740000	3.62E+08	0.00695
1.3826	1	0.9786	1.2816	558.338	3.44E+08	317117100	3.57E+08	0.007
1.3982	1	0.9828	1.3096	564.856	3.39E+08	312366900	3.52E+08	0.00705
1.4135	1	0.9865	1.338	571.273	3.33E+08	307509200	3.46E+08	0.0071
1.4286	1	0.9897	1.3668	577.59	3.28E+08	302562300	3.41E+08	0.00715
1.4434	1	0.9925	1.3958	583.803	3.22E+08	297543800	3.35E+08	0.0072
1.458	1	0.9947	1.4251	589.911	3.17E+08	292470100	3.29E+08	0.00725
1.4723	1	0.9966	1.4548	595.915	3.11E+08	287356500	3.23E+08	0.0073
1.4864	1	0.998	1.4847	601.811	3.06E+08	282217200	3.18E+08	0.00735
1.5003	1	0.999	1.515	607.602	3E+08	277065200	3.12E+08	0.0074
1.5138	1	0.9996	1.5455	613.285	2.95E+08	271912800	3.06E+08	0.00745
1.5271	1	0.9999	1.5763	618.863	2.89E+08	266770900	3E+08	0.0075
1.532	1	1	1.5877	620.896	2.87E+08	264876200	2.98E+08	0.00751
1.532	1	1	1.6189	626.328	2.82E+08	259819600	2.92E+08	0.00756
1.532	1	1	1.6504	631.657	2.76E+08	254895900	2.87E+08	0.00761
1.532	1	1	1.6821	636.885	2.71E+08	250101400	2.81E+08	0.00766
1.532	1	1	1.7141	642.015	2.66E+08	245432400	2.76E+08	0.00771
1.532	1	1	1.7463	647.05	2.61E+08	240885600	2.71E+08	0.00776
1.532	1	1	1.7788	651.991	2.56E+08	236457400	2.66E+08	0.00781
1.532	1	1	1.8115	656.843	2.52E+08	232144500	2.61E+08	0.00786
1.532	1	1	1.8444	661.606	2.47E+08	227943500	2.57E+08	0.00791
1.532	1	1	1.8776	666.283	2.43E+08	223851200	2.52E+08	0.00796

1.532	1	1	1.9111	670.877	2.38E+08	219864400	2.47E+08	0.00801
1.532	1	1	1.9447	675.389	2.34E+08	215980000	2.43E+08	0.00806
1.532	1	1	1.9786	679.822	2.3E+08	212195100	2.39E+08	0.00811
1.532	1	1	2.0127	684.177	2.26E+08	208506600	2.35E+08	0.00816
1.532	1	1	2.047	688.457	2.22E+08	204911700	2.31E+08	0.00821
1.532	1	1	2.0816	692.664	2.18E+08	201407600	2.27E+08	0.00826
1.532	1	1	2.1163	696.799	2.15E+08	197991700	2.23E+08	0.00831
1.532	1	1	2.1512	700.864	2.11E+08	194661300	2.19E+08	0.00836
1.532	1	1	2.1864	704.861	2.07E+08	191413800	2.15E+08	0.00841
1.532	1	1	2.2217	708.791	2.04E+08	188246700	2.12E+08	0.00846
1.532	1	1	2.2573	712.657	2.01E+08	185157800	2.08E+08	0.00851
1.532	1	1	2.293	716.46	1.97E+08	182144600	2.05E+08	0.00856
1.532	1	1	2.3289	720.201	1.94E+08	179204800	2.02E+08	0.00861
1.532	1	1	2.365	723.882	1.91E+08	176336400	1.98E+08	0.00866
1.532	1	1	2.4013	727.504	1.88E+08	173537200	1.95E+08	0.00871
1.532	1	1	2.4377	731.069	1.85E+08	170805100	1.92E+08	0.00876
1.532	1	1	2.4744	734.578	1.82E+08	168138100	1.89E+08	0.00881
1.532	1	1	2.5112	738.032	1.79E+08	165534400	1.86E+08	0.00886
1.532	1	1	2.5482	741.433	1.77E+08	162992000	1.83E+08	0.00891
1.532	1	1	2.5853	744.783	1.74E+08	160509200	1.81E+08	0.00896
1.532	1	1	2.6227	748.081	1.71E+08	158084300	1.78E+08	0.00901
1.532	1	1	2.6602	751.33	1.69E+08	155715400	1.75E+08	0.00906
1.532	1	1	2.6978	754.53	1.66E+08	153401000	1.73E+08	0.00911
1.532	1	1	2.7356	757.683	1.64E+08	151139600	1.7E+08	0.00916
1.532	1	1	2.7736	760.789	1.61E+08	148929600	1.68E+08	0.00921
1.532	1	1	2.8117	763.851	1.59E+08	146769400	1.65E+08	0.00926
1.532	1	1	2.85	766.868	1.57E+08	144657800	1.63E+08	0.00931
1.532	1	1	2.8884	769.842	1.55E+08	142593200	1.6E+08	0.00936
1.532	1	1	2.9269	772.773	1.52E+08	140574400	1.58E+08	0.00941
1.532	1	1	2.9656	775.663	1.5E+08	138600100	1.56E+08	0.00946
1.532	1	1	3.0045	778.513	1.48E+08	136668900	1.54E+08	0.00951
1.532	1	1	3.0435	781.324	1.46E+08	134779800	1.52E+08	0.00956
1.532	1	1	3.0826	784.095	1.44E+08	132931500	1.5E+08	0.00961
1.532	1	1	3.1219	786.829	1.42E+08	131122800	1.48E+08	0.00966
1.532	1	1	3.1613	789.526	1.4E+08	129352800	1.46E+08	0.00971
1.532	1	1	3.2009	792.186	1.38E+08	127620300	1.44E+08	0.00976
1.532	1	1	3.2405	794.811	1.36E+08	125924200	1.42E+08	0.00981
1.532	1	1	3.2803	797.401	1.35E+08	124263700	1.4E+08	0.00986
1.532	1	1	3.3203	799.957	1.33E+08	122637700	1.38E+08	0.00991
1.532	1	1	3.3603	802.48	1.31E+08	121045300	1.36E+08	0.00996
1.532	1	1	3.4005	804.97	1.29E+08	119485600	1.34E+08	0.01001
1.532	1	1	3.4408	807.428	1.28E+08	117957700	1.33E+08	0.01006

1.532	1	1	3.4813	809.855	1.26E+08	116460800	1.31E+08	0.01011
1.532	1	1	3.5218	812.252	1.25E+08	114994000	1.29E+08	0.01016
1.532	1	1	3.5625	814.618	1.23E+08	113556600	1.28E+08	0.01021
1.532	1	1	3.6033	816.955	1.22E+08	112147800	1.26E+08	0.01026
1.532	1	1	3.6442	819.262	1.2E+08	110766800	1.25E+08	0.01031
1.532	1	1	3.6852	821.542	1.19E+08	109412900	1.23E+08	0.01036
1.532	1	1	3.7263	823.794	1.17E+08	108085500	1.22E+08	0.01041
1.532	1	1	3.7676	826.018	1.16E+08	106783800	1.2E+08	0.01046
1.532	1	1	3.8089	828.216	1.14E+08	105507100	1.19E+08	0.01051
1.532	1	1	3.8504	830.388	1.13E+08	104254900	1.17E+08	0.01056
1.532	1	1	3.892	832.534	1.12E+08	103026600	1.16E+08	0.01061
1.532	1	1	3.9337	834.654	1.1E+08	101821400	1.15E+08	0.01066
1.532	1	1	3.9754	836.751	1.09E+08	100638900	1.13E+08	0.01071
1.532	1	1	4.0173	838.822	1.08E+08	99478510	1.12E+08	0.01076
1.532	1	1	4.0593	840.87	1.07E+08	98339620	1.11E+08	0.01081
1.532	1	1	4.1014	842.895	1.05E+08	97221740	1.09E+08	0.01086
1.532	1	1	4.1436	844.897	1.04E+08	96124350	1.08E+08	0.01091
1.532	1	1	4.1859	846.876	1.03E+08	95046940	1.07E+08	0.01096
1.532	1	1	4.2283	848.833	1.02E+08	93989040	1.06E+08	0.01101
1.532	1	1	4.2708	850.768	1.01E+08	92950180	1.05E+08	0.01106
1.532	1	1	4.3134	852.682	99621150	91929880	1.03E+08	0.01111
1.532	1	1	4.3561	854.576	98535140	90927720	1.02E+08	0.01116
1.532	1	1	4.3988	856.448	97468330	89943260	1.01E+08	0.01121
1.532	1	1	4.4417	858.301	96420250	88976100	1E+08	0.01126
1.532	1	1	4.4847	860.133	95390450	88025810	99072770	0.01131
1.532	1	1	4.5277	861.946	94378510	87092000	98021770	0.01136
1.532	1	1	4.5709	863.74	93384030	86174300	96988900	0.01141
1.532	1	1	4.6141	865.515	92406600	85272330	95973740	0.01146
1.532	1	1	4.6574	867.271	91445820	84385720	94975860	0.01151
1.532	1	1	4.7008	869.01	90501310	83514140	93994900	0.01156
1.532	1	1	4.7443	870.73	89572710	82657230	93030460	0.01161
1.532	1	1	4.7879	872.433	88659650	81814660	92082140	0.01166
1.532	1	1	4.8316	874.118	87761780	80986120	91149620	0.01171
1.532	1	1	4.8753	875.787	86878770	80171270	90232510	0.01176
1.532	1	1	4.9191	877.438	86010280	79369840	89330500	0.01181
1.532	1	1	4.963	879.074	85155980	78581500	88443220	0.01186
1.532	1	1	5.007	880.693	84315580	77805980	87570380	0.01191
1.532	1	1	5.0511	882.296	83488770	77043000	86711660	0.01196
1.532	1	1	5.0953	883.883	82675240	76292280	85866720	0.01201
1.532	1	1	5.1395	885.455	81874710	75553560	85035290	0.01206
1.532	1	1	5.1838	887.012	81086900	74826580	84217070	0.01211
1.532	1	1	5.2	887.576	80802760	74564370	83921960	0.01213

Литература

- [1] Зоран Ристић, Милисав Јаковљевић: Основи наоружања, Београд, 2003.
- [2] Александар Кари, Презентације са наставе Конструкција артиљеријских оруђа, Београд, 2018.
- [3] Александар Стаматовић: Конструисање пројектила, Београд, 1995.
- [4] Анализа концепције решења артиљеријских оруђа фамилије „НОРА“, Војнотехнички гласник, Београд, 2011.
- [5] Савремено наоружање и војна опрема, Војнотехнички гласник, Београд, 2018.
- [6] Конструкција и прорачун цеви и затварача артиљеријских оруђа, скрипта, Београд, 1985.
- [7] Топ – хаубица 152 mm М84 НОРА - А , интернет адреса:
<https://www.pravda.rs/2020/2/8/ruska-samohodna-haubica-koalicija-sv-je-zastrasujuca-ali-i-srpska-nora-je-brutalna-uporedite-ih-pa-sami-procenitevideo/>,
приступљено 05.07.2020. године.
- [8] Топ – хабуца 152 mm М84 НОРА - А, интернет адреса:
<http://www.vti.mod.gov.rs/index.php?view=actuality&type=reference&category=1&id=111>,
приступљено: 05.07.2020. године.
- [9] Топ – хабуца 152 mm М84 НОРА - А, интернет адреса:
<http://www.paluba.info/smf/index.php?topic=1357.0>,
приступљено: 05.07.2020. године.
- [10] Самоходна хаубица 155 mm Нора Б – 52, интернет адреса:
http://www.vs.rs/sr_cyr/o-vojsci/naoruzanje/artiljerija,
приступљено: 05.07.2020. године.
- [11] Самоходна хаубица Цезар 155 mm, интернет адреса:
<https://hi-in.facebook.com/baivt/posts/francuska-samohodna-haubica-155mm-caesar-camion-equipe-dun-systeme-d-artillerie-/1383073078516253/>,
приступљено: 10.07.2020. године
- [12] Самоходна хаубица Цезар 155 mm, интернет адреса:
<https://www.mycity-military.com/Artiljerija-municija-i-protivoklopna-sredstva/Samohodna-haubica-CAESAR.html>,
приступљено: 10.07.2020. године.
- [13] Јужноафричка самоходна хаубица Г6 155 mm, интернет адреса:
https://pl.m.wikipedia.org/wiki/Denel_G6,
приступљено: 10.07.2020. године.
- [14] Јужноафричка самоходна хаубица Г6 155 mm, интернет адреса:
<https://www.facebook.com/Sveovojsci/posts/g-6-samohodna-top-haubica-155-mm-samohodni-artiljerijski-sistem-g-6-razvijen-je-t/1696401030643459/>,

приступљено: 10.07.2020. године.

[15] Кинеска самоходна хаубица ПЛ345, интернет адреса
<https://hrvatski-vojniki.hr/kineske-samohodne-haubice-i-dio/>,
приступљено: 10.07.2020. године.

[16] Хаубица 155 mm ФХ – 70, интернет адреса:
<https://hr.wikipedia.org/wiki/FH-70>,
приступљено: 10.07.2020. године.

[17] Хаубица 155 mm ФХ – 70, интернет адреса:
<https://www.net-maquettes.com/sr/pictures/fh70-howitzer/>,
приступљено: 10.07.2020. године.

[18] Америчка хаубица 155 mm M198, интернет адреса:
https://en.wikipedia.org/wiki/M198_howitzer,
приступљено: 10.07.2020. године.

[19] Америчка хаубица 155 mm M198, интернет адреса:
<https://www.net-maquettes.com/sr/pictures/m198-howitzer/>,
приступљено: 10.07.2020. године.

[20] Руска самоходна хаубица 152 mm МСТА – С, интернет адреса:
<https://www.mycity-military.com/Artiljerija-municija-i-protivoklopna-sredstva/Samohodna-haubica-MSTA-S-2S19-152mm.html>,
приступљено: 10.07.2020. године.

[21] Руска самоходна хаубица 2С3 Akatsiya 152 mm, интернет адреса:
https://hr.wikipedia.org/wiki/2S3_Akatsiya,
приступљено: 10.07.2020. године.