

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



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Мастер академске студије

Модул: Општи смер

Предмет: Унутрашње балистичко пројектовање

Број индекса: 325/2018

Лазар С. Обрадовић

УНУТРАШЊЕ-БАЛИСТИЧКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ
ЦЕВИ ТОПА 30mm

Мастер рад

Комисија за преглед и одбрану:

1. Др Небојша Христов, доцент – ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

ПРИЛОГ 6: Пријава мастер рада



Универзитет у Крагујевцу
Факултет инжењерских наука



Основне студије: **Војноиндустријско инжењерство**

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

Име и презиме: **Лазар Обрадовић**

Број индекса: 325/2018

ПРИЈАВА МАСТЕР РАДА

Тема рада: **УНУТРАШЊЕ-БАЛИСТИЧКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ**

ЦЕВИ ТОПА 30mm

Задатак: Примарни задатак мастер рада је дефинисање процедура пројектовања цеви топа 30 mm. Кроз мастер рад треба да се презентују табличне методе пројектовања и упоређивање са нумеричким прорачуном елемената цеви. Кандидат треба да изврши оптимизацију полазних параметара. Одговарајућим алгоритмом ће бити креиран систем за нумерички прорачун конструктивних параметара елемената цеви са одговарајућим сигурносним коефицијентима. На основу конструктивних параметара је неопходно да се изради 3D модел цеви одговарајућим CAD алатом. Након израде 3D модела кандидат треба да применом нелинеарне анализе изврши симулацију оптерећења у карактеристичним пресецима и да анализу оптерећења са предлозима за додатну оптимизацију и евентуалне дораде модела. Овим радом кандидат треба првенствено да презентује методолошки приступ код пројектовања цеви за било који систем класичног наоружања.

Ментор:

Др Небојша Христов, доцент

Крагујевац, 08.06.2020. године

ABSTRACT

This master thesis studies entire process of barrel designing for 30 mm autocannon. Mathematical model and program solutions for all stages are presented. The first couple of chapters analyzes tabular, analytical and numerical method of internal ballistic calculation. By manipulation of several parameters, analytical method is optimized. During this process, the pressure of gunpowder gases and initial missile velocity had been compared. The second part of thesis describes methodology of designing processes for barrel and calculates external and internal trajectory of the barrel by the usage of numerical algorithm. Based on the previous results, the barrel for 30 mm autocannon had been modeled in CAD software. In the last section of master thesis all internal ballistic designing methods for the barrels had been compared. Via finite element method the barrel had been calculated and tested on the stresses and deformations. Further analysis determines if the barrel stresses overcome yield stress and if the deformations are low enough. Recommendations are proposed for further barrel optimization.

Key words: *designing, barrel, autocannon, tabular, analytical, numerical, method, stresses, deformations.*

РЕЗИМЕ

Овај мастер радом изучава целокупан процес пројектовања цеви аутоматског топа 30 mm. Приказани су математички модели и програмска решења за све етапе. Први део рада обухвата табличну, аналитичку и нумеричку методу унутрашње-балистичког прорачуна. Врши се оптимизација аналитичке методе варирањем неколико параметара. При томе се упоређује притисак барутних гасова и почетна брзина пројектила. У другом делу се описује методологија процеса пројектовања цеви и врши прорачун спољашње и унутрашње трасе цеви нумеричким алгоритмом. На основу добијених резултата се у CAD софтверу моделира цев атоматског топа 30 mm. У последњем делу мастер рада се врши упоредна анализа свих метода УБ пројектовања цеви. Методом коначних елемената се врши прорачун измоделиране цеви на напрезања и деформације. Даљом анализом се утврђује да ли напони у цеви превазилазе напон течења материјала и да ли су деформације довољно ниске. Дају се препоруке за даљу оптимизацију цеви.

Кључне речи: *пројектовање, цев, аутоматски топ, таблична, аналитичка, нумеричка, метода, напони, деформације.*

Садржај:

1. УВОД.....	8
2. ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ АРТИЉЕРИЈСКИХ СИСТЕМА ПВО.....	9
3. ТАБЛИЧНИ ПРОРАЧУН МЕТОДОМ СЛУХОЦКОГ.....	14
4. АНАЛИТИЧКИ УБ ПРОРАЧУН МЕТОДОМ ДРОЗДОВА.....	19
4.1. Математички модел УБ прорачуна методом Дроздова.....	19
4.1.1. Претходни период	21
4.1.2. Први период сагоревања.....	22
4.1.3. Други период сагоревања	22
4.2. Програмско решење УБ прорачуна методом Дроздова	22
4.3. Оптимално решење УБ прорачуна методом Дроздова.....	24
5. НУМЕРИЧКИ УБ ПРОРАЧУН МЕТОДОМ ДВОФАЗНОГ СТРУЈАЊА	27
5.1. Основне једначине струјања	27
5.1.1. Полазне претпоставке	28
5.1.2. Математички модел	29
5.2. Допунске једначине система	31
5.3. Програмско решење УБ прорачуна методом двофазног струјања.....	33
6. ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ЦЕВИ ТОПА 30 mm	36
6.1. Математички модел еластичне отпорности цеви.....	36
6.2. Еластична отпорност моноблок цеви	37
6.3. Коефицијент сигурности цеви	39
6.4. Методологија прорачуна моноблок цеви на чврстоћу	40

6.5. Поступак пројектовања моноблок цеви	41
6.6. Програмско решење за димензионисање цеви топа 30 mm	43
7. АНАЛИЗЕ РЕЗУЛТАТА ПРОРАЧУНА У ПРОЦЕСУ ПРОЈЕКТОВАЊА ЦЕВИ ТОПА 30 mm	47
7.1. Компаративна анализа табличне и аналитичке методе УБ прорачуна	47
7.2. Компаративна анализа резултата УБ прорачуна аналитичком методом са вредностима већ постојећег средства	48
7.3. Компаративна анализа нумеричке и аналитичке методе УБ прорачуна	48
7.4. Испитивање цеви на напоне и деформације помоћу ФЕМ анализе	51
7.4.1. Анализа напонског стања цеви	53
7.4.2. Анализа деформација цеви	54
8. ЗАКЉУЧАК	56
СПИСАК КОРИШЋЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ	58
ПРИЛОГ 1	59
ПРИЛОГ 2	61
ПРИЛОГ 3	63
ПРИЛОГ 4	71

Списак ознака:

a	/	константа
a_{21}	/	однос спољашњег и унутрашњег радијуса цеви
B, B_1	/	параметри Дроздова
c_p	J/kgK	специфична топлота при константном притиску
c_w, c_v	J/kgK	специфична топлота при константној запремини
d	m	калибар
d_k	m	пречник канала цеви у пределу барутне коморе
e, E	J/kg	јединична унутрашња енергија барутних гасова
E	Pa	модул еластичности материјала
e_0	J/kgK	енергија барутних гасова на почетку првог периода
e_b	J/kg	јединична енергија ослобођена сагоревањем барута

E_0	m/s	кинетичка енергија пројектила на устима цеви
f	$/$	параметар утицаја површинских сила границе двеју компонената
f_b	J/kg	специфичан рад барутних гасова
h_{tmax}	s	максимални корак по времену
I_k	$Pa \cdot s$	укупан импулс притиска барутних гасова
k	$/$	однос специфичних топлота
K_e	J/m^3	коэффициент моћи оруђа
K_L	m/s^2	коэффициент искоришћења дужине цеви
K_m	kg/m^3	коэффициент масе пројектила
K_{mb}	J/m^3	коэффициент искоришћења јединице масе пуњења
K_n	$/$	средњи број опаљења
L_c	m	дужина цеви
L_c/d	m	дужина цеви у калибрима
l_0	m	сведена дужина барутне коморе
l_k	m	дужина барутне коморе
l_{pk}	m	дужина прелазног конуса
l_u	m	дужина пута пројектила у цеви
l_z	m	дужина жлебљеног дела цеви
m	kg	маса, маса пројектила
m_b	kg	маса барутног пуњења
m_{z0}	kg	почетна маса барутног зрна
n	$/$	број тачака по променљивој S , коэффициент сигурности цеви
N	$/$	радни век цеви
n_s	$/$	коэффициент ожљебљења
p	Pa	притисак барутних гасова
p_0	Pa	притисак форсирања
p_1	Pa	притисак на унутрашњој површини цеви
p_{1gr}	Pa	граница еластичне отпорности цеви
p_{1gr}^{IV}	Pa	еластична отпорност цеви
p_b	Pa	балистички притисак
p_{dm}, p_{bm}	Pa	максимални притисак барутних гасова на дно цеви
p_m	Pa	средњи максимални притисак барутних гасова
p_{mk}	Pa	притисак барутних гасова на дно цеви
p_{mkr}	Pa	максимални крешерни притисак барутних гасова
p_p	Pa	притисак припале
p_{pm}	Pa	максимални притисак барутних гасова на дно пројектила
q	J/kg	енергија ослобођена сагоревањем 1 kg барута
Q	J/kg	укупна енергија барутних гасова
r_1	m	унутрашњи радијус цеви
r_{1k}	m	највећи унутрашњи радијус барутне коморе
r_2	m	спољашњи радијус цеви
r_z	m	дубина продирања пламена у барутно зрно (пут пламена)
r_0	m	половина дебљине барутног зрна
r_b	m	почетна дебљина барутног зрна
r_{b0}	m	пут пламена на почетку првог периода
r_{km}	m	највећи радијус барутне коморе
R	$J/molK$	универзална гасна константа
R_m	Pa	затезна чврстоћа
S, S_c	m^2	површина попречног пресека цеви
S_b	m^2	површина барутних зрна

S_g	m^2	површина барутних гасова
S_k	m^2	контактна површина барутних зрна и барутних гасова
S_{kom}	m^2	површина попречног пресека цеви у пределу барутне коморе
S_z	m^2	површина једног барутног зрна
S_{z0}	m^2	почетна површина барутног зрна
t	s	време
t_0	s	време трајања претходног периода
T	K	температура барутних гасова
T_{b0}	K	почетна температура барутног зрна
T_m	K	Највиша температура барутних гасова
u	$m/s, m$	брзина струјања барутних гасова, апсолутне радијалне деформације
u_b	m/s	брзина барутних зрна
u_z	m/s	брзина сагоревања барута
u_{z0}	m/sPa	јединична брзина сагоревања барута
v_{lim}	m/s	лимитна брзина пројектила
v	m/s	брзина пројектила
V_0	m/s	почетна брзина пројектила
V_{tab}	m/s	таблична брзина пројектила
w	m	апсолутне аксијалне деформације
W	m^3	запремина, контролна запремина
w_g	m^3/kg	специфична запремина барутних гасова
W_0	m^3/mol	запремина барутне коморе
W_b	m^3	запремина коју заузимају барутна зрна
W_g	m^3	запремина коју заузимају барутни гасови
W_{pk}	m^3	запремина прелазног конуса
W_z	m^3	тренутна запремина једног барутног зрна
W_{z0}	m^3	почетна запремина једног барутног зрна
W_ψ	m^3	слободна запремина
x	m	релативно сагорела дебљина барутног зрна
X	m	пут пројектила
X_0	m	сведена (фиктивна) дужина барутне коморе
X_{kom}	m	стварна дужина барутне коморе
X_u	m	укупни пут пројектила у цеви
X_ψ	m	сведена дужина слободне запремине
y	$/$	релативна сагорела дебљина барутног зрна
Z	$/$	параметар
α	m^3/kg	коволумен барутних гасова
α_0	W/mK	почетни коефицијент провођења топлоте
β	$/$	однос димензија барутног зрна
γ	$/$	однос димензија барутног зрна
ε	$/$	порозност
ε_0	$/$	порозност на почетку првог периода
ε_r	$\%$	релативне радијалне деформације
ε_t	$\%$	релативне тангенцијалне деформације
ε_z	$\%$	релативне аксијалне деформације
η	sPa	коефицијент динамичке вискозности
θ	$/$	однос специфичних топлота умањен за један
φ	$/$	коефицијент фиктивности
κ, λ, μ	$/$	коефицијенти облика
κ_1, λ_1	$/$	коефицијенти облика

λ_b	/	коэффициент прелаза топлоте
λ_u	/	релативни пут пројектила
ν	$m, /$	апсолутне тангенцијалне деформације, Поасонов коэффициент
ρ	kg/m^3	густина барутног пуњења, густина материјала
ρ_0	kg/m^3	густина барутних гасова на почетку првог периода
ρ_b	kg/m^3	запреминска маса барута
σ	/	релативна сагоревајућа површина барутног зрна
σ_e, R_e	Pa	напон течења (граница еластичности) материјала
σ_r	Pa	напрезање у радијалном правцу
σ_t	Pa	напрезање у тангенцијалном правцу
σ_z	Pa	напрезање у аксијалном правцу
τ	/	коэффициент пада температуре барутних гасова при истицању
χ	/	коэффициент проширења барутне коморе
χ_n	/	параметар
ψ	/	релативна сагорела маса барута

Списак слика:

Слика 2.1 Прага, двоцевни аутоматски топ калибра 30 mm.....	10
Слика 2.2 Аутомат ПА тона 30/2 mm М-53/59.....	11
Слика 4.1 Притисак б/г, брзина и пређени пут пројектила у функцији времена .	23
Слика 4.2 Притисак б/г и брзина пројектила у функцији пређеног пута	23
Слика 4.3 Притисак б/г, брзина и пут пројектила у зависности од времена	26
Слика 5.1 Систем цеви са пројектилом	27
Слика 5.2 Контролна запремина са барутним зрнима и барутним гасовима	29
Слика 6.1 Шема напрезања и деформација цеви.....	36
Слика 6.2 Изглед барутне коморе и прелазног конуса	40
Слика 6.3 Крива конструкционог притиска.....	41
Слика 6.4 Упоредни приказ прорачунског и конструкционог притиска	45
Слика 6.5 Приказ контуре зида цеви.....	45
Слика 6.6 Изометријски приказ новопроектване цеви	46
Слика 7.1 Упоредни приказ притисака б/г у функцији времена	50

Слика 7.2 Упоредни приказ брзина пројектила у функцији времена	50
Слика 7.3 Мрежа коначних елемената цеви АТ 30 mm.....	52
Слика 7.4 Напони у зиду цеви при максималном притиску барутних гасова	53
Слика 7.5 Напони у зиду цеви на крају сагоревања барута.....	53
Слика 7.6 Напони у зиду цеви на крају процеса опаљења	53
Слика 7.7 Деформације зида цеви при максималном притиску барутних гасова	54
Слика 7.8 Деформације зида цеви на крају сагоревања барута.....	54
Слика 7.9 Деформације зида цеви на крају процеса опаљења	54
Слика 7.10 Радијалне деформације унутрашњег канала цеви	55

Списак табела:

Табела 2.1 Конструкциони подаци	11
Табела 2.2 Даљина гађања	12
Табела 2.3 Вертикално поље дејства.....	12
Табела 2.4 Висина ватрене линије	12
Табела 2.5 Највећа висина топа	12
Табела 2.6 Подаци о тежинама	13
Табела 3.1 Веза између одређених параметара	16
Табела 3.2 Резултати прорачуна	18
Табела 4.1 Улазни подаци за УБ прорачун.....	23
Табела 4.2 Вредности параметара који се варирају уз приказ номиналних вредности	24
Табела 4.3 Подаци улазне датотеке оптималног решења прорачуна методом Дроздова	25

Табела 4.4. Вредности одступања оптималног решења у односу на постојеће .	26
Табела 5.1 Полазни подаци двофазног УБ прорачуна	34
Табела 5.2 Притисак барутних гасова у карактеристичним тачкама.....	35
Табела 6.1 Полазни подаци за димнезионисање цеви	44
Табела 7.1 Упоредни приказ резултата УБ прорачуна табличном и аналитичком методом	47
Табела 7.2 Упоредни приказ резултата УБ прорачуна аналитичком методом и већ постојећих вредности	48
Табела 7.3 Упоредни приказ притиска б/г и брзине пројектила за методе Дроздова и ДФ	49
Табела 7.4 Својства материјала цеви АТ 30 mm	52

1. УВОД

Овај мастер рад има за циљ стварање комплетне слике процеса пројектовања цеви, и то кроз методолошки приступ применљив за било који систем класичног наоружања. Као полазно средство за модификацију и поређење разматран је аутоматски противавионски топ 30/2 mm М-53/59. Сам процес пројектовања цеви интегрише табличне методе пројектовања цеви са одговарајућим УБ прорачуном, алгоритмом за нумерички прорачун конструктивних параметара елемената цеви, затим моделирање цеви помоћу одговарајућег CAD алата и на крају структурну анализу на напоне и деформације при задатим оптерећењима у критичним пресецима. Таблични метод представља УБ прорачун методом Слухоцког, аналитички метод представља прорачун УБ параметара методом Дроздова док се нумерички метод односи на прорачун УБ параметара методом двофазног струјања.

Први део мастер рада пружа увид у историјски развој артиљеријских система противваздухопловне одбране (ПВО) чега су противавионски топови саставни део. У том одељку су приказани сви тактичко-технички подаци за средство ПРАГА са противавионским топом 30/2 mm М-53/59.

Други део обухвата теоријску разраду кроз математичке моделе за табличну, аналитичку и нумеричку методу унутрашњебалистичких прорачуна жељених параметара. Сваки математички модел прате одговарајући прорачуни за конкретне вредности параметара цеви топа 30 mm. За аналитички и нумерички модел су развијена програмска решења која у многосте убрзавају процес прорачуна. Када се ради о аналитичком моделу извршено је варирање одређених величина у циљу одабира оптималних вредности кључних унутрашње-балистичких параметара.

Трећи део се односи на методологију у приступу димензионисању цеви, где се кроз математички модел пружа увид у проблематику еластичне отпорности цеви, сам процес пројектовања цеви и правилну примену коефицијената сигурности. За конкретне вредности улазних параметара развијен је алгоритам који нумеричким путем врши прорачун еластичне отпорности, и уз примену коефицијената сигурности дефинише спољашњу и унутрашњу трасу цеви. При томе се строго води рачуна да се не пређе граница еластичности одабраног материјала. На основу тих вредности се у CAD алату за 3Д моделирање креира цев аутоматског топа у калибру 30 mm.

Последњи део мастер рада обухвата анализу целокупног процеса пројектовања цеви. То се врши кроз међусобно упоређивање компатибилних параметара за табличну, аналитичку и нумеричку методу као и за већ постојеће средство. При томе се на основу вредности кључних параметара, попут почетне брзине пројектила и максималног притиска барутних гасова, разматра који је приступ пројектовању најповољнији за дато средство. Претходно измоделирана цев се подвргава дејству притиска барутних гасова који је прорачунат нумеричком методом УБ прорачуна. Уместо нелинеарне анализе која прати целокупан процес опаљења, разматрано је понашање цеви у тренутку максималног притиска барутних гасова, у тренутку краја сагоревања барута и на крају процеса опаљења (наиласку пројектила на уста цеви). У одговарајућем софтверу се врши прорачун методом коначних елемената а добијени резултати се анализирају на унутрашње напоне и деформације цеви. Услов је да не дође до пластичних деформација, односно да напон у цеви не превазиђе напон течења материјала који је унапред дефинисан. Деформације морају остати у малим границама. Након анализе на напон и деформацију, дају се предлози за даљу оптимизацију и евентуалне дораде модела.

2. ИСТОРИЈСКИ РАЗВОЈ АРТИЉЕРИЈСКИХ СИСТЕМА ПВО

Противавионски топови су интегрални део артиљеријских система ПВО. Због тога је њихов развој уско везан за развој самих ПВО система. Сви противавионски топови раде у аутоматском режиму паљбе. У почетку развој артиљеријских ПВО система није имао складан ток. Педесетих година прошлог века већина војних стручњака сматрала је да су ракетни системи ПВО способни да решавају све задатке и проблеме ПВО. Искуства из ратова вођених после Другог Светског Рата демантовала су их јер је авијација променила тактику — коришћење малих висина за лет и дејство — где су до изражаја дошли сви недостаци ракетних система ПВО: недовољна ефикасност, споро реаговање и велики небрањени простор око оруђа.

То је приморало војне стручњаке да већу пажњу поклоне цевној противавионској артиљерији, којој су постављени нови захтеви: повећање дмета и ватрене моћи, повећање прецизности гађања и угаоних брзина навођења оруђа, смањење времена готовости за отварање ватре, повећање поузданости, отпорности и једноставности у руковању, опслуживању и повећање мобилности [1].

Да би се ти захтеви могли испоштовати, савремени артиљеријски системи ПВО морају имати следеће карактеристике [1]:

- мултисензорске системе за управљање ватром повезане у више аутоматизоване системе ваздушног осматрања и јављања са уређајима за идентификацију циљева;
- веће почетне брзине пројектила (1000 до 1300 *m/s*) и брзине гађања (500 до 600 метака у минути);
- високу ефикасност на циљу (близински упаљачи, префрагментирани пројектили са већим експлозивним пуњењем, поткалибарни стреласти пројектили, програмабилни упаљачи);
- повећану маневарску способност (уградња на гусенична и точкашка возила);
- комбинацију артиљеријских и ракетних система на једном средству (хибридни системи ПВО);
- увођење оптронице, радарских и ласерских, ИЦ, термовизијских и комбинованих система за управљање ватром.

Нова генерација артиљеријских система ПВО опремљена је мултисензорском групом за сигурно откривање циљева у свим условима борбених дејстава на врло малим висинама и великим даљинама од 15 до 25 *km*. Ти сензори омогућавају уз веома кратко време реаговања, да рачунари брзо, прецизно и истовремено израчунавају елементе балистичких и метеоролошких поправки [1].

Упоребом интегрисаних радара у два и више фреквентних опсега, уз могућност праћења пасивним сензорима, обезбеђена је солидна заштита од електронског ометања.

Један, два или више аутоматска топа калибра 20 *mm* до 40 *mm*, са континуираним храњењем, омогућавају гађање циљева до даљине од 4 *km* са довољном густином ватре.

Тенденција развоја цевних артиљеријских система ПВО данас се у свету одвија у два правца: ка потпунијој аутономији и ка модификацији и усавршавању система калибра 20 *mm* до 57 *mm* (на западу су то калибри од 20 *mm* до 40 *mm*, а на истоку од 23 *mm* до 57 *mm*) [1].

У познатије савремене аутоматске противавионске топове спадају: француски *GIAT AMX-13 DXA 30/2*, швајцарски *OERLIKON Buhrle 35/2*, амерички *Vulcan 20/6*, грчки *Artemis 30/2*, чешки *Praga 30/2*, руски *ZSU 23/4 Šiljka* и *ZSU 57-2*, шведски *Bofors 40 mm Tridon* и немачки *Gepard 35/2*. На слици 2.1 приказан је самоходни двоцевни топ калибра 30 mm, *Praga* [1].



Слика 2.1 Прага, двоцевни аутоматски топ калибра 30 mm [2]

Противавионски топ 30/2 mm М-53/59 је аутоматски топ намењен за гађање циљева у ваздуху, а по потреби и циљева на земљи и води. Има велику ватрену моћ и сталну готовост за вођење борбе. Конструкција возила и топа омогућују његову борбену употребу:

- с возила на кратком застанку;
- с возила за време вожње;
- с ватреног положаја на земљи (након скидања топа са возила).

Ефикасну ватру отвара на циљеве у ваздуху који лете брзином до 1000 km/h. Највећа висина гађања циљева у ваздуху је 3000 m а даљина 3500 m. Циљеви на земљи и води, као што су: митраљеска гнезда, оклопни транспортери, самоходни топови, групни живи циљеви и сл., гађају се на даљинама до 2000 m [3].

За гађање циљева употребљавају се:

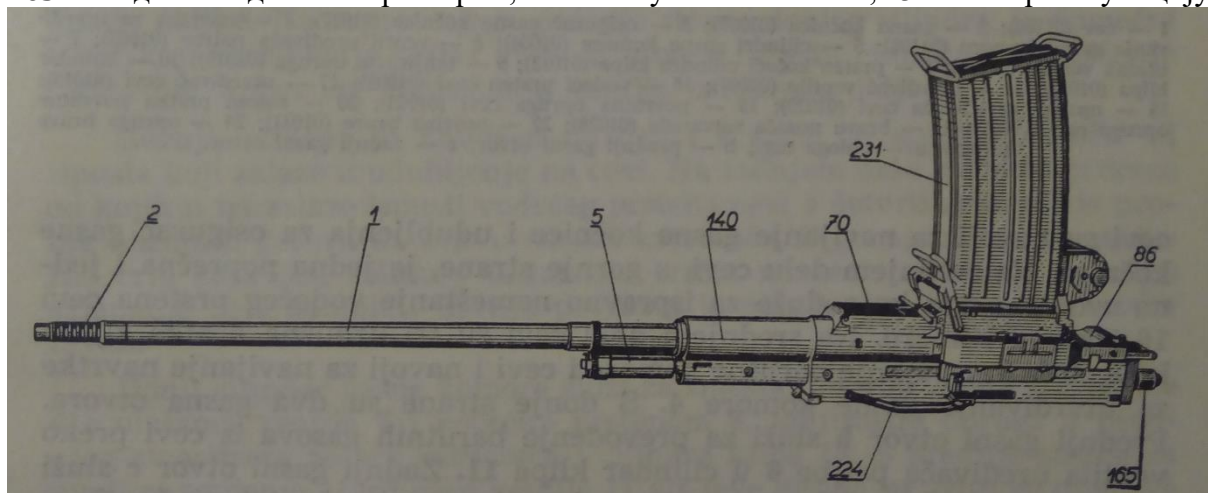
- Тренутно-фугасна обележавајућа граната;
- Панцирно-запаљиво обележавајуће зрно.

Конструкција лафета и самог возила омогућава брзо спуштање топа с возила и дизање на возило. Праћење циљева је ручно и електрично. Електричним начином постоји могућност праћења циљева с две брзине.

Противавионски систем 30/2 mm М-53/59 се састоји од два аутоматска топа (при интеграцији на гусеничну платформу оклопног транспортера ВТР-Т уграђен је један аутомат), лафета, нишанских справа и електричних уређаја топа. Аутомат је конструисан на принципу превођења барутних гасова на боку цеви с кратким трзајем цеви, дугим трзањем носача затварача и с опаљивањем при кретању цеви напред. Тело затварача је вертикално клинасто покретано од стране носача затварача у задњаку. Под дејством барутних гасова носач затварача креће се уназад а у предњи положај се враћа под дејством задњег амортизера и повратне опруге. При кретању у предњи положај носач затварача уводи метак у цев, ослобађа утврђивач оквира разводника у положају за пуњење и води тело затварача. По извршеном опаљивању метка под дејством енергије барутних гасова на дно чауре, уназад, покреће се цев, задњак и затварач [3].

Након извршеног одбрављивања носач затварача потискивањем тела затварача на горе, отвара цев, затим извлачи и избацује чауру, ослобађа утврђивач оквира разводника у положају за избацивање, потискује полуку разводника доводећи оквир разводника у положај за потискивање метка у цев. Код прекида гађања носач затварача је задржан у задњем положају задржаčem носача затварача. Ослобађање носача затварача се врши деловима за окидање аутомата чије се активирање може вршити ножно механички и ножно електромагнетски. Цев се у предњи положај враћа под дејством повратне опруге цеви. По извршеном опаљењу свих метака из оквира за муницију, врши се аутоматски прекид паљбе тако да у устима разводника остају четири метка не опаљена. Ако оквир метка није постављен на аутомат и ако полука за ручно запињање носача затварача и цеви, једна или обе, није у предњем положају, не може се извршити окидање аутомата [3].

На слици 2.2 приказан је изглед аутомата ПА топа а у табелама 2.1-2.6 приказани су основни тактичко-технички подаци. Основни делови аутомата су: 1 – цев; 2 – гасна кочница; 5 – гасна комора; 70 – предњи поклопац; 86 – задњи поклопац; 140 – сандук; 165 – окидач са задњим амортизером; 224 – полука за запињање; 231 – оквир за муницију.



Слика 2.2 Аутомат ПА топа 30/2 mm М-53/59 [3]

Табела 2.1 Конструкциони подаци [3]

Карактеристика	Вредност	Јединица мере
Калибар цеви	30	mm
Дужина цеви с гасном кочницом	2335	mm
Дужина саме цеви	2190	mm
Дужина водишта зрна	1985	mm
Дужина барутне коморе	204	mm
Број жљебова	16	/
Увијање жљебова	Константно, с лева у десно	/
Корак	800	mm
Ширина жљеба	3,6	mm
Највећи притисак барутних гасова у цеви	3500	MPa
Почетна брзина	1000	m/s
Домет у хоризонталној равни	6300	m
Домет у вертикалној равни	9700	m

Табела 2.2 Даљина гађања [3]

Карактеристика	Вредност	Јединица мере
У вертикалној равни	3000	<i>m</i>
У хоризонталној равни	3500	<i>m</i>
Ефикасна даљина гађања	2000	<i>m</i>
Теоретска брзина гађања (за обе цеви)	900	<i>metaka/min.</i>
Практична брзина гађања (за обе цеви)	120 до 150	<i>metaka/min.</i>
Дужина трзања цеви при елевацији 0°	18 до 27	<i>mm</i>
Хоризонтално поље дејства	360	°

Табела 2.3 Вертикално поље дејства [3]

Карактеристика	Вредност	Јединица мере
Топа на возилу	10 до +85	°
Топа на возилу преко кабине	2 до +85	°
Топа на возилу преко осматрачке куполе	0 до +85	°
Топа на земљи	10 до +85	°

Табела 2.4 Висина ватрене линије [3]

Карактеристика	Вредност	Јединица мере
Топа на возилу	2100	<i>mm</i>
Топа на земљи (највећа)	1065	<i>mm</i>
Топа на земљи (најмања)	975	<i>mm</i>
Дужина топа с возилом у маршевском положају	6920	<i>mm</i>
Дужина топа на ватреном положају (без возила)	3835	<i>mm</i>

Табела 2.5 Највећа висина топа [3]

Карактеристика	Вредност	Јединица мере
На возилу код нулте елевације и с намештеним оквирима за муницију	2950	<i>mm</i>
На возилу код највеће елевације	4650	<i>mm</i>
На земљи код нулте елевације с намештеним оквирима за муницију	1864	<i>mm</i>
На земљи при највећој елевацији	3525	<i>mm</i>
Најнижа тачка (клиренс)	400	<i>mm</i>
Највећа ширина топа с аутомобилом	2345	<i>mm</i>
Дужина платформе	2000	<i>mm</i>
Висина платформе од тла	1100	<i>mm</i>
Висина страница платформе	300	<i>mm</i>
Размак предњих точкова	1870	<i>mm</i>
Размак задњих, унутрашњих, точкова	1485	<i>mm</i>
Размак задњих, спољашњих, точкова	2025	<i>mm</i>
Дебљина предњег оклопа	10	<i>mm</i>
Дебљина бочног оклопа	6	<i>mm</i>

Табела 2.6 Подаци о тежинама [3]

Карактеристика	Вредност	Јединица мере
Тежина топа с возилом, муницијом и услугом	10,3	<i>t</i>
Тежина топа	1750	<i>kg</i>
Тежина празног оквира за муницију	32	<i>kg</i>
Тежина пуног оквира	89	<i>kg</i>
Тежина једног аутомата без оквира за муницију	224,1	<i>kg</i>
Тежина цеви с гасном кочницом	78,2	<i>kg</i>

3. ТАБЛИЧНИ ПРОРАЧУН МЕТОДОМ СЛУХОЦКОГ

Прорачун унутрашње балистичких параметара цеви аутоматског топа 30 mm извршен је применом методе Слухоцког. Поред израза из теорије примењују се ГАУ таблице (Прилог 1) као и табеле које је саставио Слухоцки. Након одређивања масе барутног пуњења (m_b) врши се њено варирање и то повећавањем за 5% а након тога за још 10% на добијену вредност. Овиме се прорачунавају унутрашње балистички параметри за три различите варијанте барутног пуњења. Након одабира оптималне варијанте, на основу одговарајућег критеријума, врши се прецизнији прорачун параметара [4].

За оруђе аутоматски топ 30 mm дати су следећи подаци [5]:

калибар: $d = 30 \text{ mm}$,
 маса пројектила: $m = 0,435 \text{ kg}$,
 почетна брзина: $V_0 = 997 \text{ m/s}$.

Прво ће бити прорачуната површина попречног пресека цеви (S_c) на основу следећег израза:

$$S = n_s d^2 \quad (3.1)$$

Коефицијент попречног пресека цеви (коефицијент ожљебљења) (n_s) узима у обзир облик жлебова и поља. Код артиљеријских оруђа се овај коефицијент креће у границама $n_s = 0,8 \div 0,82$, док код стрељачких оружја износи $n_s = 0,82 \div 0,83$. Како је у питању аутоматски топ, $n_s = 0,82$ [4].

Површина попречног пресека цеви износи:

$$S = 0,82 \cdot 30^2 = 738 \text{ mm}^2$$

Кинетичка енергија пројектила на устима цеви E_0 рачуна се на следећи начин:

$$E_0 = \frac{1}{2} m V_0^2 = \frac{1}{2} \cdot 0,435 \cdot 997^2 = 216197 \text{ J} \quad (3.2)$$

Коефицијент моћи оруђа (K_e) се дефинише као однос кинетичке енергије пројектила на устима цеви и калибра на трећу:

$$K_e = \frac{E_0}{d^3} = \frac{216197}{30^3 \cdot 10^{-9}} = 8007,3 \text{ MJ/m}^3 \quad (3.3)$$

Коефицијент моћи оруђа се креће у границама $(1 \div 17) \text{ GJ/m}^3$.

Коефицијент масе пројектила (K_m) дефинише се као однос масе пројектила и калибра на трећу:

$$K_m = \frac{m}{d^3} = \frac{0,435}{30^3 \cdot 10^{-9}} = 16111 \text{ kg / m}^3 \quad (3.4)$$

Коефицијент масе пројектила је један од најважнијих параметара. Он зависи од намене и конструкције пројектила и за разорне пројектиле износи $K_m = (12 \div 16) \cdot 10^3 \text{ kg / m}^3$ док се за обичне панцирне пројектиле креће у границама $K_m = (16 \div 18) \cdot 10^3 \text{ kg / m}^3$ [4].

Уколико су познати маса барутног пуњења и густина пуњења (ρ), запремина барутне коморе (W_0) се рачуна на следећи начин:

$$W_0 = \frac{m_b}{\rho} \quad (3.5)$$

Сведена (фиктивна) дужина барутне коморе дефинише се као однос запремине барутне коморе и површине попречног пресека цеви:

$$X_0 = \frac{W_0}{S} \quad (3.6)$$

Релативни пут пројектила (λ_u) дефинише се као однос укупног пута пројектила у цеви (X_u) и сведене дужине барутне коморе:

$$\lambda_u = \frac{X_u}{X_0} \quad (3.7)$$

Коефицијент проширења барутне коморе (χ) утиче на дужину цеви и за артиљеријска оруђа се креће у границама $1,05 \div 3$. Овај коефицијент дефинише се као однос сведене дужине барутне коморе и стварне дужине барутне коморе (X_{kom}):

$$\chi = \frac{X_0}{X_{kom}} \quad (3.8)$$

Током процеса опаљења, у цеви оружја/оружја долази до изразито турбулентног двофазног струјања због изузетно велике брзине дефлаграције. Због нехомогености саме смеше и високих брзина одвијања физичко-хемијских процеса притисак барутних гасова у делу цеви иза пројектила варира. Највиши је на дну канала цеви (у барутној комори) а најнижи непосредно уз пројектил. За потребе аналитичких метода се прорачунава средњи притисак б/г дуж канала цеви и то у тренутку достизања максималног притиска б/г како би се поједноставили изрази. У моменту када се прорачуном добије средњи максимални притисак p_m , притисак б/г на дно цеви је p_{mk} . На полигону се помоћу крешера мери тзв. максимални крешерни притисак p_{mkr} на дно цеви. При мерењима овог притиска, систематска грешка мерења је око 12%, тако да важи релација [4]:

$$p_{mkr} = \frac{p_{mk}}{1,12} \quad (3.9)$$

У литератури је дефинисана веза између притисака p_m и p_{mkr} [4] применом следеће релације:

$$p_m = \frac{1,12\varphi p_{mkr}}{1,02 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_b}{m} \frac{\lambda_u + 1}{\lambda_u + 1} \chi \right)} \quad (3.10)$$

где је φ — коефицијент фиктивности.

Применом табеле 3.1 за везу између одређених параметара коју је саставио Слухоцки, читавају се максимални крешерни притисак p_{mkr} , густина пуњења ρ , коефицијент проширења барутне коморе χ , коефицијент искоришћења јединице масе пуњења K_{mb} и дужина цеви у калибрима L_c/d . Параметри се усвајају на основу вредности коефицијента моћи оруђа ($K_e = 8007,3 \text{ MJ/m}^3$).

Табела 3.1 Веза између одређених параметара [4]

$10^{-7} K_e$ [J / m ³]	p_{mkr} [MPa]	ρ [kg / m ³]	χ	$10^{-4} K_{mb}$ [J / m ³]	L_c / d
100	170	500	1,02	124	14
200	195	550	1,09	120	23
300	220	590	1,18	117	31
400	240	620	1,28	114	38
500	260	640	1,39	112	44
600	280	660	1,50	110	51
700	295	670	1,61	108	57
800	310	680	1,73	107	64
900	325	690	1,85	106	71
1000	335	690	1,98	105	78
1100	345	700	2,11	104	85
1200	355	710	2,25	104	91
1300	365	710	2,40	103	98
1400	375	720	2,57	103	105
1500	390	730	2,75	102	112
1600	400	740	2,95	102	119

Приказана табела састављена је за $K_m = 15000 \text{ kg} / \text{m}^3$. Прорачуном је добијено $K_m = 16111 \text{ kg} / \text{m}^3 \approx 15000 \text{ kg} / \text{m}^3$ па се очитане вредности могу усвојити и користити као такве и сматрати релевантним.

Из табеле 3.1 следи:

$$p_{mkr} = 310 \text{ MPa} \quad \rho = 680 \text{ kg/m}^3 \quad \chi = 1,73 \quad K_{mb} = 107 \cdot 10^4 \text{ J/kg}$$

K_{mb} представља коефицијент искоришћења јединице масе пуњења. Дефинише се као однос кинетичке енергије пројектила на устима цеви и масе пуњења:

$$K_{mb} = \frac{E_0}{m_b} \quad (3.11)$$

На основу претходног израза се израчунава маса барутног пуњења:

$$m_b = \frac{E_0}{K_{mb}} = \frac{216197}{107 \cdot 10^4} = 0,202 \text{ kg} \quad (3.12)$$

На основу израза 3.5 одређује се запремина барутне коморе:

$$W_0 = \frac{0,202}{680} = 297,157 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$$

На основу израза 3.6 дефинише се фиктивна дужина барутне коморе:

$$X_0 = \frac{297,157 \cdot 10^{-6}}{738 \cdot 10^{-6}} = 0,403 \text{ m}$$

Коефицијент фиктивности се одређује на основу следећег израза:

$$\varphi = a + \frac{1}{3} \frac{\lambda_u + \frac{1}{\chi} \cdot \frac{m_b}{m}}{\lambda_u + 1} \quad (3.13)$$

где је a – константа која за топове велике моћи износи 1,03 и као таква се усваја.

Уколико се занемари коефицијент проширења барутне коморе, тада се коефицијент фиктивности и максимални средњи притисак рачунају на основу следећих израза:

$$\varphi = a + \frac{1}{3} \cdot \frac{m_b}{m} = 1,03 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,202}{0,435} = 1,185 \quad (3.14)$$

$$p_m = \frac{1,12 \varphi p_{mkr}}{1,02 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_b}{m} \right)} = \frac{1,12 \cdot 1,185 \cdot 310}{1,02 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{0,202}{0,435} \right)} = 327 \text{ MPa} \quad (3.15)$$

Како би се правилно примениле ГАУ табеле неопходно је познавати густину пуњења, средњи максимални притисак и табличну брзину пројектила (V_{tab}). Ова брзина се рачуна на следећи начин:

$$V_{tab} = V_0 \sqrt{\frac{\varphi m}{m_b}} = 997 \sqrt{\frac{1,185 \cdot 0,435}{0,202}} = 1592 \text{ m/s} \quad (3.16)$$

Из ГАУ таблица се на основу ова три податка читавају вредности за релативни пут пројектила, параметар Дроздова (B), λ_k и ν_k .

Параметар Дроздова се рачуна на основу следећег израза:

$$B = \frac{S^2 I_k^2}{\varphi m m_b f_b} \quad (3.17)$$

где је f_b – специфичан рад барутних гасова. При прорачуну методом Слухоцког се усваја његова средња вредност $f_b = 950000 \text{ J/kg}$ [4].

Резултати прорачуна су приказани у табели 3.2.

Табела 3.2 Резултати прорачуна

Образац	Јединица	Резултати		
		I варијанта	II варијанта	III варијанта
m_b	$[kg]$	0,202	0,212	0,233
$W_0 = m_b / \rho$	$[m^3]$	$297,157 \cdot 10^{-6}$	$311,77 \cdot 10^{-6}$	$342,65 \cdot 10^{-6}$
$K_{mb} = (E_0 / m_b)$	$[J / kg]$	$1069,93 \cdot 10^3$	$1019,8 \cdot 10^3$	$927,884 \cdot 10^3$
$X_0 = W_0 / S_c$	$[m]$	0,403	0,422	0,464
$\varphi = 1,03 + (1/3) \cdot m_b / m$	$[-]$	1,185	1,192	1,209
$p_m = \frac{1,12 \varphi p_{mkr}}{1,02 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_b}{m} \right)}$	$[MPa]$	327	326	325
$v_{tab} = v_0 \sqrt{\frac{\varphi m}{m_b}}$	$[m / s]$	1592	1559	1498
λ_u (таблице ГАУ)	$[-]$	4,108	3,8	3,305
$X_u = X_0 \cdot \lambda_u$	$[m]$	1,656	1,604	1,534
$X_{kom} = X_0 / \chi$	$[m]$	0,233	0,244	0,268
$L_c / d = \frac{X_{kom} + X_u}{d} + 1,5$	$[-]$	64,5	63,1	61,6
$\chi_n = \frac{1}{\frac{1}{\chi} + \frac{0,75d}{X_0}}$	$[-]$	1,578	1,584	1,596
V_1 / V_0	$[-]$	0,153916	0,144560	0,150275
$K_L = (V_0^2 / L_c)$	$[m / s^2]$	513700	525097	537884
$N = K_n \frac{\lambda_u + 1}{(m_b / m) \lambda_u V_0^2 (V_1 / V_0)^2}$	$[-]$	6,82	7,486	6,5
$Z = K_{mb} K_L^4 \sqrt{N}$	$[-]$	1,946	2,121	1,98

Коначне вредности УБ параметара, прорачунате методом Слухоцког износе:

$$d = 30 \cdot 10^{-3} m, \quad m = 0,435 kg, \quad V_0 = 997 m/s, \quad S = 738 \cdot 10^{-6} m^2, \quad \rho = 680 kg / m^3, \\ m_b = 0,212 kg, \quad W_0 = 311,756 \cdot 10^{-6} m^3, \quad E_0 = 216197 J, \quad K_m = 16111 kg/m^3, \\ K_{mb} = 1019,797 \cdot 10^3 J/kg, \quad X_0 = 0,422 m, \quad \varphi = 1,309, \quad p_{mkr} = 310 MPa, \quad p_m = 328 MPa, \\ \lambda_u = 3,7, \quad \chi = 1,73, \quad X_{kom} = 0,244 m, \quad X_u = 1,561 m, \quad L_c / d = 63,1 \text{ и } B = 1,738 m^2 / kg.$$

Уколико је то потребно могуће је израчунати укупан импулс силе притиска б/г у току процеса опаљења применом следећег израза [4]:

$$I_k = \frac{1}{S} \sqrt{B \cdot \varphi \cdot m \cdot f_b \cdot m_b} = \frac{1}{738 \cdot 10^{-6}} \sqrt{1,738 \cdot 1,309 \cdot 0,435 \cdot 9,5 \cdot 10^5 \cdot 0,212} = 0,5739 MPas$$

(3.18)

4. АНАЛИТИЧКИ УБ ПРОРАЧУН МЕТОДОМ ДРОЗДОВА

У циљу одређивања узајамне везе развоја притиска б/г и пређеног пута пројектила унутар цеви оруђа, дефинисане су одговарајуће зависности између карактеристичних величина. То је уједно и основни задатак унутрашње балистике и овим прорачунима се утврђује да ли пројектил има довољну почетну брзину на устима цеви и да ли у току процеса опаљења притисак б/г у цеви прелази дозвољену границу.

4.1. Математички модел УБ прорачуна методом Дроздова

Систем једначина унутрашње балистике који је потребно решити методом Дроздова сачињавају следеће једначине [6]:

- 1) Једначина биланса енергије:

$$pS_c (X_\psi + X) = f_b m_b \psi - \frac{k-1}{2} \phi m v^2 \quad (4.1)$$

- 2) Једначина кретања пројектила:

$$\phi m \frac{dv}{dt} = pS_c \quad (4.2)$$

- 3) Дефиниција брзине пројектила (v):

$$v = \frac{dX}{dt} \quad (4.3)$$

- 4) Брзина сагоревања барута (u_z):

$$u_z = u_{z0} p \quad (4.4)$$

$$\text{односно:} \quad \frac{dy}{dt} = \frac{u_{z0}}{r_0} p = \frac{p}{I_k} \quad (4.5)$$

- 5) Релативна сагорела маса барута (ψ):

$$\psi = \kappa y (1 + \lambda y + \mu y^2) \quad (4.6)$$

$$\psi = \kappa_1 y (1 + \lambda_1 y) \quad (4.7)$$

- 6) Релативна сагоревајућа површина барутног зрна (σ):

$$\sigma = 1 + 2\lambda y + \mu y^2 \quad (4.8)$$

$$\text{или:} \quad \sigma = 1 + 2\lambda_1 y \quad (4.9)$$

- 7) Сведена дужина слободне запремине (X_ψ):

$$X_\psi = \frac{W_\psi}{S_c} = \frac{1}{S_c} \left[W_0 - \frac{m_b}{\rho_b} (1 - \psi) - \alpha m_b \psi \right] \quad (4.10)$$

где су: k – однос специфичних топлота $\left(k = \frac{c_p}{c_w} \right)$, c_p – специфична топлота при константном притиску, c_w – специфична топлота при константној запремини, X – пређени пут пројектила, u_{z0} – јединична брзина сагоревања барута, y – релативна сагорела дебљина барута $\left(y = \frac{r_z}{r_0} \right)$, r_z – пут пламена, r_0 – половина дебљине барута, t – време одвијања процеса, α – коволумен б/г, $\kappa, \lambda, \mu, \kappa_1, \lambda_1$ – коефицијенти облика.

Овом систему једначина се по потреби могу придодати друге помоћне једначине.

Прорачуном методом Дроздова процес опаљења се посматра на поједностављен начин због сложености реалног процеса и често недовољног познавања појединих параметара који утичу на резултате опаљења. У циљу поједностављења процеса, које омогућава решавање система једначина, усвајају се следеће претпоставке [6]:

- барутно пуњење сагорева по претпоставкама геометријског закона;
- сагоревање барута се одвија при средњем притиску p (мада се он у стварности мења од дна чауре до дна пројектила);
- закон брзине сагоревања је линеаран $u_z = u_{z0} p$;
- секундарни радови б/г су пропорционални основном раду трансляторног кретања пројектила и узимају се у обзир преко коефицијента фиктивности φ ;
- топлотни губици се узимају у обзир индиректно смањењем специфичног рада б/г f_b или повећањем експонента θ ;
- узима се да је константно и једнако средњој вредности, мада оно има мању вредност у почетку процеса опаљења, а касније расте са смањењем температуре гасова;
- састав продуката сагоревања се при опаљењу не мења, тако да су специфичан рад б/г f_b и коволумен б/г α константни;
- рад урезивања водећег прстена у жлебове цеви се не узима у обзир; сматра се да пројектил мирује док притисак б/г не достигне вредност притиска форсирања p_0 ; урезивање се сматра тренутним а не постепеним, како се стварно и одвија;
- кретање пројектила у цеви се разматра само до тренутка проласка његовог дна кроз уста цеви;
- занемарују се деформације зидова цеви при опаљењу и губитак б/г кроз зазоре између водећег прстена и канала цеви, као и отпор ваздуха у цеви на кретање пројектила;
- код оруђа са истицањем гасова, истицање б/г започиње истовремено са покретањем пројектила. Истицање б/г је стационарно без избацивања несагорелих барутних зрна. Уколико је присутан велики отвор за истицање б/г узима се у обзир пад температуре гасова преко коефицијента $\tau = \frac{T}{T_m} < 1$, који се одређује експерименталним путем.

Методом Дроздова се унутрашњебалистички параметри, који егзистирају у процесу опаљења, изражавају у функцији једне независно променљиве. Избор независно променљиве величине се врши тако да су за њу познати почетни и крајњи услови. По препорукама професора Дроздова, независно променљива за први период је релативно сагорела дебљина барута, док је за други период то пут пројектила.

Како би се дефинисале законитости кретања пројектила у току процеса опаљења, систем једначина се решава по периодима. Прорачун времена се изводи за целокупан процес опаљења.

Све константне величине које улазе у систем једначина представљају полазне податке чије су бројачане вредности у напред познате. Ови полазни подаци су груписани као [6]:

- карактеристике цеви: S_c, W_0, X_u ;
- карактеристике пројектила: m, p_0, φ и
- карактеристике барута: $m_b, f_b, \alpha, u_{z0}, \rho_b, \theta, 2r_0, \kappa, \lambda, \mu, (\kappa_1, \lambda_1)$.

Метода Дроздова се изводи за барутна зрна дегресивног облика. Уколико су барутна зрна прогресивног облика попут седмоканалног барута, потребно је дебљину барутног зрна помножити са фактором $10/7$ и срачунати коефицијенте облика као за цилиндрично једноканално зрно. У оквиру методе Дроздова разматрају се 3 карактеристична периода и то [6]:

- 1) претходни период,
- 2) први период и
- 3) други период.

4.1.1. Претходни период

Кроз физичку слику процеса опаљења, у претходном периоду се одвија нагли пораст притиска b/g у цеви оруђа/оружја услед активирања иницијалне каписле, најчешће механичким путем. Експлозивно пуњење надаље запаљује припалу од црног барута као и бездимни барут. Тада започиње процес дефлаграције (сагоревања) чврсте фазе, односно барутних зрна. Када притисак барутних гасова достигне одговарајућу вредност он потискује пројектил и врши рад на еласто-пластичном деформисању чауре. Тиме се у јако малом временском интервалу и на растојању од свега неколико милиметара врши покретање пројектила и остварује прираштај запремине. Када пројектил напусти чауру започиње други период. За разлику од физичке слике процеса, претходни период се у методи Дроздова посматра као стационаран, без покретања пројектила. Постоји само сагоревање барута у константној запремини. Притисак b/g расте од притиска припале $-p_p$ до притиска форсирања $-p_0$. Није потребно вршити прорачун претходног периода, већ се врши прорачун одговарајућих карактеристика на крају претходног периода, које су уједно и полазни подаци за први период. Променљиве величине су: ψ , σ и y . Њихове вредности на крају претходног, односно на почетку првог периода, се означавају индексом 0 [6].

Уз познати притисак форсирања p_0 , уз почетне услове $X = v = 0$, за крај претходног периода се може писати:

$$\psi_0 = \frac{\frac{W_0}{m_b} - \frac{1}{\rho_b}}{\frac{f_b}{p_0} + \alpha + \frac{1}{\rho_b}} \quad (4.11)$$

Једначине за крај претходног периода имају облик:

$$\psi_0 = \kappa_1 y_0 (1 + \lambda_1 y_0) \quad (4.12)$$

$$\sigma_0 = 1 + 2\lambda_1 y_0 \quad (4.13)$$

Решавањем ових једначина се добија:

$$\sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\kappa_1} \psi_0} \quad (4.14)$$

$$y_0 = \frac{\sigma_0 - 1}{2\lambda_1} \quad (4.15)$$

Уколико је потребно срачунати време трајања претходног периода, тада се на основу израза за притисак у функцији времена, при константној запремини, добија:

$$t_0 = \frac{I_k(1-\alpha\rho)}{f_b\rho} \ln \frac{p_0}{p_p} \quad (4.16)$$

где је:

$$I_k = \frac{r_0}{u_{z0}} \quad (4.17)$$

4.1.2. Први период сагоревања

Први период започиње покретањем пројектила услед савладавања притиска форсирања. Пројектил се преко своје кошуљице, односно водећег прстена урезаје у жљебове цеви. Прелазни конус омогућава да се ово урезивање одвија постепено и тиме оствари најправилније деформисање водећег прстена, у циљу што бољег заптивања. Тиме се остварује нагли пораст притиска б/г у цеви и тиме максимално убрзање пројектила. Крај првог периода се огледа у сагоревању последњих барутних зрна.

➤ Полазни подаци су: $t = v = X = 0, y_0, p_0, \psi_0, \sigma_0$

➤ Крајњи подаци су: $t_k, v_k, X_k, p_k, y_k = \psi_k = 1$

Како би се изразиле све зависне променљиве, неопходно је одредити независно променљиву. Као независна променљива усваја се релативна сагорела дебљина барутног зрна са почетка првог периода [6]:

$$x = y - y_0. \quad (4.18)$$

За време првог периода се независно променљива мења од нуле до вредности $x_k = 1 - y_0$.

4.1.3. Други период сагоревања

Са сагоревањем последњих барутних зрна у цеви ватреног оружја преостаје гасовита фаза (барутни гасови). Услед разлике притисака иза и испред пројектила врши се његово кретање кроз цев чиме се повећава његова брзина. Изласком пројектила из цеви оружја/оруђа, завршава се други период сагоревања након чега преостали б/г истичу из цеви до изједначења притисака. Индексом k (крај сагоревања) се означавају величине са почетка другог периода док се индексом u (уста цеви) означавају величине с краја другог периода [6].

➤ Почетни услови су: $\psi = 1, v_k, X_k, p_k$

➤ Крајњи услови су: v_u, X_u, p_u

За независно променљиву се усваја пут пројектила X , који се мења од X_k до X_u .

4.2. Програмско решење УБ прорачуна методом Дроздова

Овај прорачун извршен је програмским решењем састављеним у *FORTTRAN*-у за методу Дроздова. Овај програм аналитичким путем решава систем једначина унутрашње балистике по периодима.

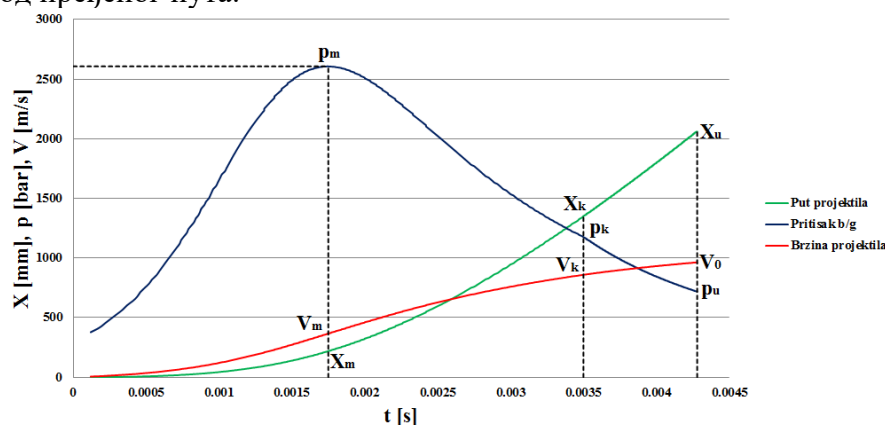
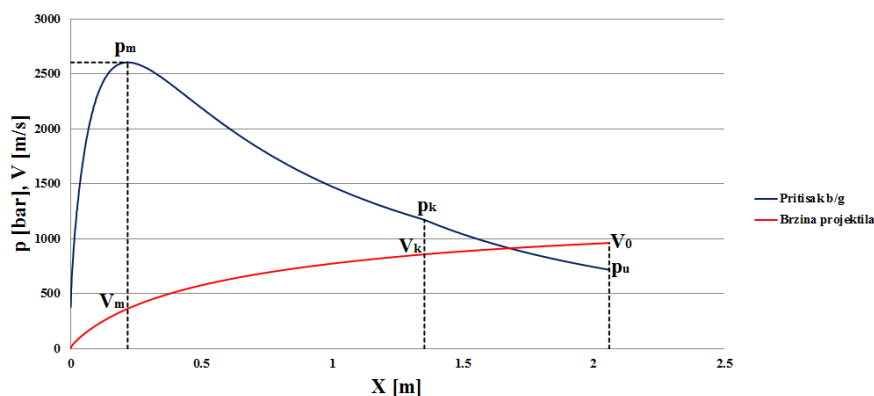
На основу претходно прорачунатих параметара и параметара задатих поставком могуће је саставити улазну датотеку 'ULAZ' програмског решења 'DROZDOV' (Прилог 2). Тиме су дефинисани сви полазни подаци за УБ прорачун, а приказани су у табели 4.1.

Након покретања програмског решења 'DROZDOV' генерише се излазна датотека под називом 'IZLAZ' која садржи зависности брзине и притиска од пређеног пута и времена, као и податке о релативно сагоревајућој маси и дебљини барутног зрна. Сви подаци у излазној датотеци приказани су по периодима сагоревања.

Табела 4.1 Улазни подаци за УБ прорачун [5,6]

Назив	Ознака	Вредност	Јединица
Запремина барутне коморе	W_0	0,000311765	m^3
Површина попречног пресека канала цеви	S_c	0,000738	m^2
Укупни пут пројектила у цеви	X_u	2,06	m
Коефицијент фиктивности	φ	1,169	/
Маса пројектила	m	0,435	kg
Маса барутног пуњења	m_b	0,195	kg
Запреминска маса барута	ρ_b	1600	kg/m^3
Коволумен барутних гасова	α	0,00103675	m^3/kg
Однос специфичних топлота умањен за 1	θ	0,269	/
Почетна дебљина барутног зрна	$2r_0$	0,000405	m
Коефицијент облика	κ_1	1,24179	/
Коефицијент облика	λ_1	-0,19471	/
Специфичан рад барутних гасова	f_b	926712,491	J/kg
Притисак форсирања	p_0	$30 \cdot 10^6$	Pa
Јединична брзина сагоревања барута	u_{z0}	$6,661710055 \cdot 10^{-10}$	$\frac{m}{s \cdot Pa}$

На слици 4.1 приказан је дијаграм зависности притиска б/г, брзине и пређеног пута пројектила од времена, док је на слици 4.2 приказана зависност притиска б/г и брзине пројектила од пређеног пута.

**Слика 4.1** Притисак б/г, брзина и пређени пут пројектила у функцији времена**Слика 4.2** Притисак б/г и брзина пројектила у функцији пређеног пута

На претходним дијаграмима су индексом „m“ означене величине у тренутку достизања максималног притиска. Индексом „k“ су означене величине на крају првог периода, односно на крају сагоревања барута. Индексом „u“ су означене величине на крају другог периода, односно у тренутку достизања уста цеви.

Уочава се да је највећа брзина пројектила управо на устима цеви, односно брзина пројектила се током целокупног процеса повећава. Она на устима цеви износи $V_{max} = V_0 = 963 \text{ m/s}$. Притисак б/г достиже своју максималну вредност недуго након покретања пројектила (у оквиру првог периода) а након тога постепено опада потискујући и даље пројектил испред себе. Највећа вредност притиска барутних гасова износи $p_{max} = 2606 \text{ bar}$. Пређени пут пројектила у почетку постепено расте да би у тренутку достизања максималног притиска почео експоненцијално да расте. То значи да тада пројектил добија највеће убрзање. Максимални пут пројектила износи 2060 mm .

Како би се испитао утицај појединих УБ параметара на развој барутних гасова и на законитости кретања пројектила, односно како би се дошло до оптималних вредности притиска барутних гасова и брзине пројектила, извршено је варирање тих УБ параметара. Најоптималнији случај је добијање што веће почетне брзине пројектила при којој укупан импулс силе барутних гасова остаје непромењен или да буде што мањи. Другим речима пожељно је да максимални притисак б/г буде што нижи уз услов да остане у дозвољеним вредностима. Варирање УБ параметара је извршено у опсегу $\pm 5\%$. Варирани су један по један параметар док су остали параметри задржали своју основну (номиналну) вредност. Номинална вредност се односи на вредност параметара из претходног дела УБ прорачуна методом Дроздова. Такође је пожељно избећи непотпуно сагоревање барута. Параметри који се варирају су:

- маса пројектила,
- маса барутног пуњења,
- количина топлоте и
- укупан пређени пут пројектила.

Сви варирани параметри су уношени у улазну датотеку 'ULAZ' независно од осталих варираних параметара како би се испитао њихов утицај на номиналне услове. У овом делу прорачуна је укупно извршено 8 прорачуна.

У табели 4.2 су приказане вредности варираних параметара при граничним вредностима и при њиховој номиналној вредности.

Табела 4.2 Вредности параметара који се варирају уз приказ номиналних вредности

Параметри за варирање	m	m_b	Q_w	X_u
Јединица	kg	kg	J/kg	m
105%	0,45675	0,20475	3517,5	2,163
100%	0,435	0,195	3350	2,06
95%	0,41325	0,18525	3182,5	1,957

4.3. Оптимално решење УБ прорачуна методом Дроздова

Како би се одредило оптимално решење за УБ прорачун при варирању карактеристичних величина, потребно је осврнути се на постављене захтеве. Главни захтев који је потребно задовољити је обезбеђење што веће почетне брзине пројектила како би му била саопштена што већа кинетичка енергија. У зависности од величина које се варирају, то обично условљава повећање максималног притиска б/г у цеви оруђа. То није случај код варирања укупног пута пројектила. Услед повећања дужине цеви максимални притисак у њој се не мења.

Потребно је водити рачуна да максимални притисак б/г остане у дозвољеним границама, како не би дошло до пластичних деформација зида канала цеви. Још један од услова је да сагоревање мора бити потпуно у циљу максималног искоришћења енергије барутних гасова. Због овог услова варирање количине топлоте смањивањем за 5% се не разматра јер се ту остварује непотпуно сагоревање. Након уношења полазних података врши се прорачун методом Дроздова и добија оптимално решење.

Уколико се изанализира максимални притисак барутних гасова уочава се да је он најнижи при смањењу масе барутног пуњења за 5% што доводи до смањења максималног притиска б/г од номиналне вредности за скоро 12%. Максимални притисак б/г достиже највећу вредност при повећању количине топлоте за 5%. Он је увећан у односу на номиналну вредност за нешто више од 21%. Овај притисак износи 315,8 МПа и он се налази у дозвољеним границама еластичне отпорности цеви. То значи да је безбедно усвојити било коју од ових варијација па се даље тежи испуњењу преосталих захтева.

Показало се да се укупан импулс силе притиска барутних гасова готово не мења при варирању укупног пређеног пута пројектила. За све преостале УБ параметре који су варијани овај импулс се смањује са смањивањем параметара а повећава се при њиховом повећању. Највеће разлике импулса силе притиска б/г се јављају при варирању количине топлоте. С обзиром да се не залази у подручје пластичне деформације јер је максимални притисак у дозвољеним границама, може се прихватити повећање укупног импулса услед повећања количине топлоте за 5%.

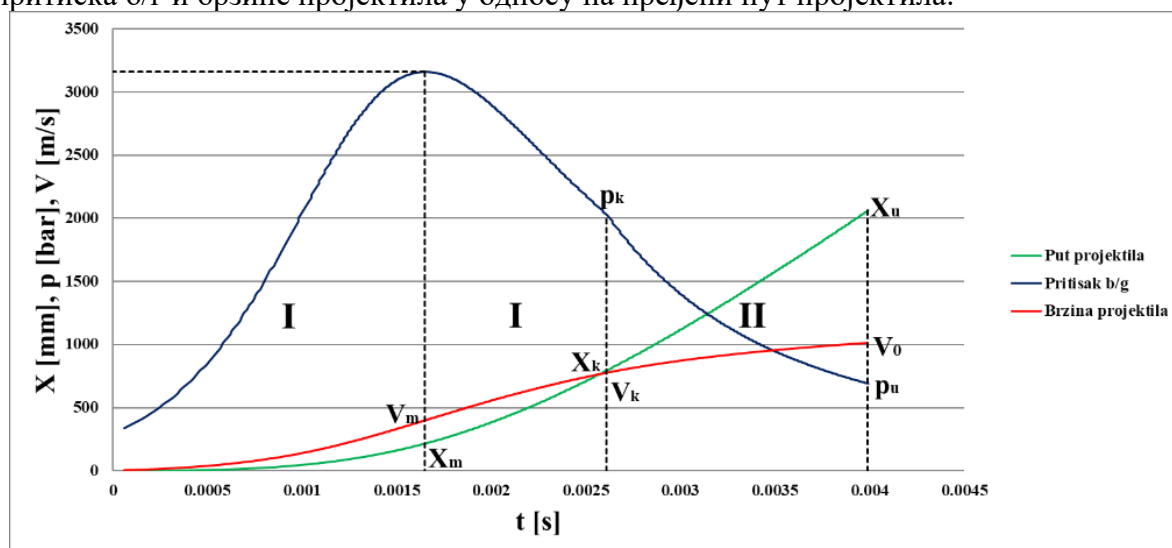
Разматрањем почетне брзине пројектила као најбитнијег параметра услед кога се и врши оптимизација УБ параметара, уочава се да она не одступа превише у односу на номиналну вредност при варирању масе пројектила и укупног пређеног пута пројектила. При варирању масе барутног пуњења и количине топлоте за 5%, почетна брзина пројектила на устима цеви је увећана за око 5% у односу на номиналну вредност. Почетна брзина највишу вредност достиже при увећању количине топлоте за 5% тако да, уз поштовање осталих услова, можемо усвојити ово решење као оптимално.

У табели 4.3 налазе се подаци за улазну датотеку оптималног решења.

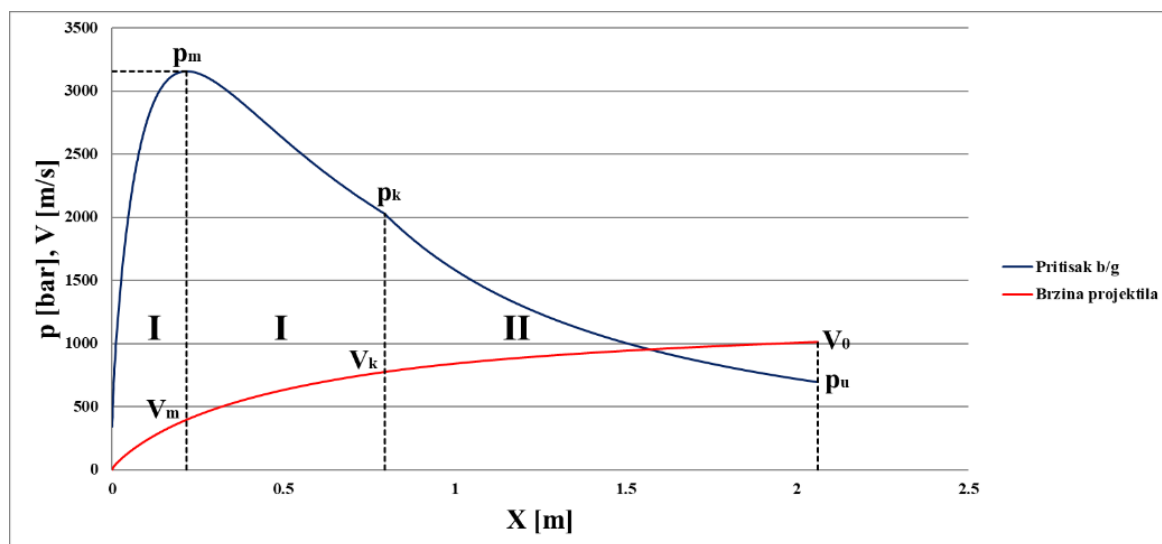
Табела 4.3 Подаци улазне датотеке оптималног решења прорачуна методом Дроздова

Назив	Ознака	Вредност	Јединица
Запремина барутне коморе	W_0	0,000311765	m^3
Површина попречног пресека канала цеви	S_c	0,000738	m^2
Укупни пут пројектила у цеви	X_u	2,06	m
Коефицијент фиктивности	φ	1,169	/
Маса пројектила	m	0,435	kg
Маса барутног пуњења	m_b	0,195	kg
Запреминска маса барута	ρ_b	1600	kg/m^3
Коволумен барутних гасова	α	0,001015787	m^3/kg
Однос специфичних топлота умањен за 1	θ	0,269	/
Почетна дебљина барутног зрна	$2r_0$	0,000405	m
Коефицијент облика	κ_1	1,24179	/
Коефицијент облика	λ_1	-0,19471	/
Специфичан рад барутних гасова	f_b	940318,116	J/kg
Притисак форсирања	p_0	$30 \cdot 10^6$	Pa
Јединична брзина сагоревања барута	u_{z0}	$7,37779556 \cdot 10^{-10}$	$\frac{m}{s \cdot Pa}$

На сликама 4.3 и 4.4 су за оптимално решење приказани дијаграми зависности притиска б/г, брзине и пређеног пута пројектила у односу на време и зависности притиска б/г и брзине пројектила у односу на пређени пут пројектила.



Слика 4.3 Притисак б/г, брзина и пут пројектила у зависности од времена



Слика 4.4 Притисак б/г и брзина пројектила у зависности од пређеног пута

У табели 4.4 су приказане вредности одступања оптималног решења у односу на постојеће.

Табела 4.4. Вредности одступања оптималног решења у односу на постојеће

	V_0 [m/s]	p_{max} [bar]	Одступања V_0 [m/s]	Одступања p_{max} [bar]	Одступања V_0 [%]	Одступања p_{max} [%]
Номинално	963	2606	0	0	0	0
Оптимално	1013	3158	50	552	5,22	21,17

5. НУМЕРИЧКИ УБ ПРОРАЧУН МЕТОДОМ ДВОФАЗНОГ СТРУЈАЊА

У циљу приближавања што реалнијој слици процеса опаљења унутар цеви оруђа развијен је модел унутрашње-балистичког прорачуна методом двофазног струјања. Док метода Дроздова пружа увид у средњи притисак барутних гасова у току процеса опаљења, метода двофазног струјања приказује различите притиске дуж унутрашњег канала цеви, што више одговара правој слици процеса опаљења. Метода двофазног струјања је нумеричка метода за разлику од методе Дроздова која је аналитичка.

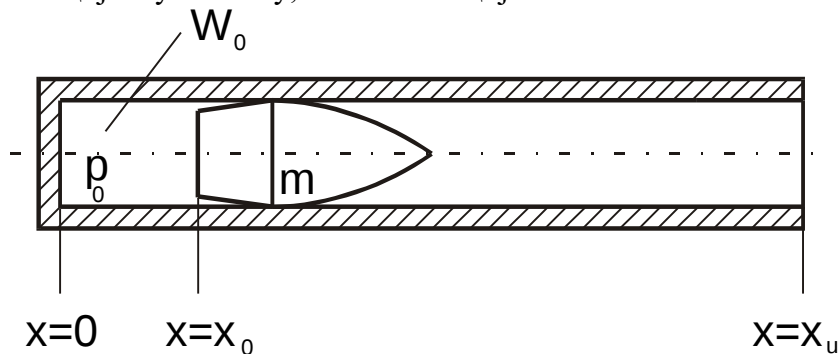
Сматра се да је пре покретања пројектила сав барут равномерно распоређен унутар барутне коморе. Док пројектил мирује простор иза пројектила се подели на једнаке делове где су границе дно цеви и дно пројектила. Моделом двофазног струјања се врше прорачуни тако да у току кретања пројектила простор иза пројектила остаје подељен на исти број једнаких сегмената као и пре покретања пројектила.

У току сагоревања барута се унутар цеви оруђа, иза пројектила, налазе чврста и гасовита компонента, односно несагорела барутна зрна и барутни гасови настали као продукт сагоревања. Пропорционални однос између ове две фазе се у току првог периода (сагоревања барутних зрна) непрестано мења. У почетку доминира чврста фаза да би се постепено претварала у гасовиту све до тренутка када на крају сагоревања не преостане само гасовита фаза. Ове две фазе су хетерогене. Поред тога што њихов однос варира кроз време он такође варира и дуж цеви. Уколико се узме произвољан временски тренутак и посматра унутрашњост цеви, очигледно је да се чврста и гасовита фаза крећу различитим брзинама па да су самим тим њихове концентрације другачије у различитим сегментима цеви. Барутни гасови су лакши од барутних зрна па се самим тим брже крећу кроз цев.

Теорија двофазног струјања важи за оруђа-оружја која имају слободно насути барут у чаури метка и само једну врсту барута. Може се примењивати и за хаубице уколико се уместо карактеристика за оба барута (у полазним подацима) уведу карактеристике фиктивног барута, срачунате по закону смеше на основу масених удела једног и другог барута у маси смеше [6].

5.1. Основне једначине струјања

Посматра се процес опаљења у цеви оруђа која је са доње стране затворена затварачем. На растојању x_0 од дна цеви (слика 5.1) налази се пројектил масе m . Ударом ударне игле у иницијалну капислу, пали се иницијални експлозив.



Слика 5.1 Систем цеви са пројектилом [7]

Створени пламен пали припалу (ако је има), а затим се пали основно барутно пуњење. Сагоревањем барута стварају се барутни гасови који попуњавају простор барутне коморе (запремина је W_0). Пројектил мирује док се не створи притисак форсирања (p_0), при којем долази до урезивања водећег прстена (кошуљице зрна) у жлебове цеви. Тада пројектил започиње кретање. Сматра се да је урезивање водећег прстена тренутно. Након покретања пројектила наставља се сагоревање барута и почиње кретање честица барутних гасова и несагорелих барутних зрна. Притисак расте до максималне вредности, а затим почиње да опада. У фази опадања притиска барутних гасова долази до завршетка сагоревања барута. По завршеном сагоревању барута наставља се кретање пројектила дуж цеви и струјање барутних гасова иза пројектила све док пројектил не излети из цеви [7].

5.1.1. Полазне претпоставке

Да би се описани процес опаљења решио у математичком смислу, односно да би се поставио систем једначина, неопходно је усвојити претпоставке на којима ће се базирати решење. При том је тежња да те претпоставке што мање нарушавају стварну физичку слику процеса, како би резултати прорачуна по изведеном систему једначина били што ближе стварним вредностима. Имајући то на уму, постављају се следеће претпоставке [7]:

- 1) у запремини елементарне дужине dx и јединичног попречног пресека важи геометријски закон сагоревања из класичне теорије;
- 2) барутна зрна су пре опаљења равномерно распоређена дуж барутне коморе;
- 3) пре покретања пројектила, смеша барутних гасова и барутних зрна је непокретна и равномерно је распоређена дуж барутне коморе;
- 4) у моменту покретања пројектила притисак у свим тачкама барутне коморе је исти (p_0);
- 5) не посматра се кретање цеви, већ само релативно кретање пројектила у односу на цев;
- 6) сматра се да је цев константног попречног пресека по целој дужини, односно занемарује се постојање прелазног конуса;
- 7) занемарује се отпор ваздуха у цеви испред пројектила;
- 8) не узима се у обзир губитак енергије услед загревања цеви;
- 9) несагорели барут и барутни гасови крећу се различитим брзинама;
- 10) координатни систем је везан за дно цеви;
- 11) почетак решавања проблема је момент покретања пројектила, а почетни услови се одређују на основу решења класичне теорије.

Геометријски закон сагоревања у класичној теорији базира се на следећим претпоставкама [7]:

- 1) Сва барутна зрна су хомогена у хемијском и физичком смислу. Овим се занемарују варијације у хемијском саставу и димензијама барутних зрна које се јављају као последица услова производње.
- 2) Сва барутна зрна се пале једновремено и тренутно. Ово значи да сва барутна зрна почињу да сагоревају у истом моменту и да сагоревање почиње у свим тачкама на површини барутног зрна.
- 3) Сагоревање барутних зрна одвија се по паралелним слојевима. Другим речима, брзина сагоревања по свим димензијама барутног зрна је иста.

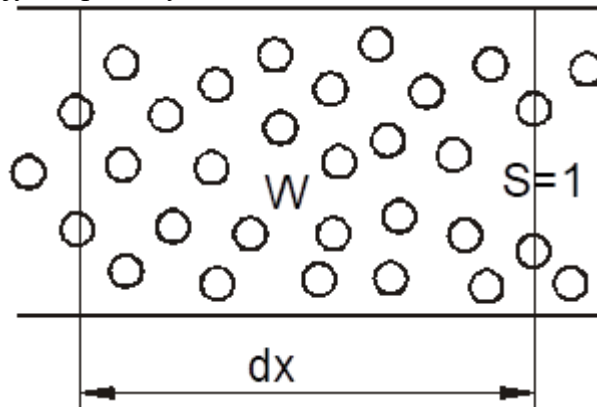
Геометријски закон сагоревања омогућава да се сагоревање барутног пуњења идентификује са сагоревањем једног барутног зрна одређеног геометријског облика. У класичној теорији овај закон се примењује на цео простор иза пројектила, а у теорији двофазног струјања само у микроокружењу и то за неке карактеристике [7].

5.1.2. Математички модел

Математички модел описан је системом од пет парцијалних диференцијалних једначина које повезују гасодинамичке параметре: брзину барутних гасова (u) и барутних зрна (u_b), притисак барутних гасова (p), густину барутних гасова (ρ), унутрашњу енергију барутних гасова (e) и порозност (ε) као однос запремине испуњене барутним гасовима и укупне запремине. Ови параметри се дају у функцији времена (t) и положаја у цеви иза пројектила (X). Овај систем једначина се допуњује једначином стања барутних гасова, неколико алгебарских једначина и полазним и граничним условима [7].

Систем једначина се дефинише за први период. Стављањем услова за крај сагоревања, систем једначина се трансформише у облик који описује стање у другом периоду. Решавање система једначина (интегрисање) врши се нумеричким путем. Једна од метода решавања је теорија коначних разлика.

При извођењу одговарајућих једначина посматра се контролна запремина W дужине dx (слика 5.2) и јединичног попречног пресека ($S=1$). Она је довољно велика да прими много барутних зрна, али је мала у поређењу са укупним димензијама струје. Барутна зрна заузимају запремину W_b ,



Слика 5.2 Контролна запремина са барутним зрнима и барутним гасовима [7]

а барутни гасови заузимају запремину W_g , тако да је:

$$W = W_b + W_g \quad (5.1)$$

Порозност представља меру попуњености запремине W барутним гасовима:

$$\varepsilon = \frac{W_g}{W} \quad (5.2)$$

Једначина континуитета за барутне гасове гласи:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon \rho) + \frac{\partial}{\partial x}(\varepsilon \rho u) = (1 - \varepsilon) \rho_b^2 \frac{u_z S_z}{m_z} \quad (5.3)$$

За крај сагоревања барута ($\varepsilon = 1$ и $f = 0$) важи:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) = 0 \quad (5.4)$$

Једначина континуитета за барут добија се разматрањем масе барута у запремини W_b која је ограничена контролном површином $S_b \cup S_k$. На основу закона о одржању масе, поставља се релација [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{W_b} \rho_b dw + \int_{S_b \cup S_k} \rho_b (\vec{u}_b - \vec{v}) \vec{n} ds = 0 \quad (5.5)$$

Једначина континуитета за барут гласи:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} [u_b (1 - \varepsilon)] = \rho_b (1 - \varepsilon) \frac{u_z S_z}{m_z} \quad (5.6)$$

На крају сагоревања барутна зрна нестају и сви чланови у претходном изразу постају једнаки нули.

При извођењу једначине кретања за барутне гасове и барутна зрна треба констатовати да нема запреминских сила у смеру струјања. Од површинских сила јавља се сила притиска на површину $S_g \cup S_k$, односно на $S_b \cup S_k$, а на површини S_k јавља се међукомпонентни отпор као последица различитих брзина барутних гасова и барутних зрна [7].

Једначина кретања барутних гасова гласи:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon \rho u^2) + \varepsilon \frac{\partial p}{\partial x} = \rho_b^2 u_b (1 - \varepsilon) \frac{u_z S_z}{m_z} - f \quad (5.7)$$

За крај сагоревања барута ($\varepsilon = 1$ и $f = 0$) добија се:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho u^2) + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (5.8)$$

Једначина кретања барутних зрна гласи:

$$\rho_b \frac{\partial}{\partial t} [u_b (1 - \varepsilon)] + \rho_b \frac{\partial}{\partial x} [u_b^2 (1 - \varepsilon)] + (1 - \varepsilon) \frac{\partial p}{\partial x} + \rho_b^2 u_b (1 - \varepsilon) \frac{u_z S_z}{m_z} = f \quad (5.9)$$

На основу закона о одржању енергије, за барутне гасове може да се напише [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \int_{W_g} \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) dw + \int_{S_g \cup S_k} \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) (\vec{u} - \vec{v}) \vec{n} ds + \int_{S_g \cup S_k} p \vec{u} \vec{n} ds - \\ - \int_{S_k} \vec{q} \vec{n} ds = \int_{S_k} \vec{F} \vec{u}_b \vec{n} ds \end{aligned} \quad (5.10)$$

где је:

e - јединична унутрашња енергија барутних гасова, а

$\vec{q}$ - јединична енергија утروшена на загревање барутног зрна.

Једначина о одржању енергије барутних гасова гласи [7]:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t} \left[\varepsilon \rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\varepsilon \rho u \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) \right] + p \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho_b (1 - \varepsilon) \frac{q S_z}{m_z} = \\ & = (1 - \varepsilon) \rho_b^2 \frac{u_z S_z}{m_z} \left(e_b + \frac{p}{\rho_b} + \frac{u_b^2}{2} \right) - f u_b \end{aligned} \quad (5.11)$$

За крај сагоревања, уз услов $\varepsilon = 1$ и $f = 0$, добија се [7]:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{u^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u \left(e + \frac{p}{\rho} + \frac{u^2}{2} \right) \right] = 0 \quad (5.12)$$

Треба напоменути да у математичком смислу крај сагоревања не мора да буде у истом моменту времена у свим тачкама цеви иза пројектила.

5.2. Допунске једначине система

У систему струјних једначина налазе се две независне променљиве (x, t) и 11 зависних променљивих, при чему се преко основних једначина израчунавају: ε , ρ , u , u_b , e , p , а преко допунских једначина: u_z , m_z , S_z , f , q .

Под претпоставком да ће се првих пет зависних променљивих добијати решавањем датих парцијалних диференцијалних једначина, за осталих шест зависних променљивих треба написати допунске једначине. Након завршеног сагоревања барута остају три парцијалне диференцијалне једначине које повезују променљиве ρ , u , p и e , па недостаје једна допунска једначина, која ће се добити из једначине стања барутних гасова [7].

Енергија барутних гасова се рачуна:

$$e = \frac{p(1 - \alpha \rho)}{\rho(k - 1)} \quad (5.13)$$

За брзину сагоревања барута усваја се линеарна зависност од притиска:

$$u_z = u_{z0} p \quad (5.14)$$

Ако се са g означи дубина продирања пламена у барутно зрно у једном смеру, онда је:

$$\frac{\partial g}{\partial t} = u_z \quad (5.15)$$

Величина g се мења од нуле до g_0 , где је g_0 половина најмање димензије барутног зрна. Како је притисак функција од (t, x) , то је и u_z функција од (t, x) . За фиксни положај x , интеграцијом израза (5.15) добија се зависност g од t . Овај принцип ће да важи и за следеће зависно променљиве величине. Помоћу пута пламена g_z , дефинише се тзв. релативна сагорела дебљина барутног зрна:

$$y = \frac{g_z}{g_0} \quad (5.16)$$

Релативна сагорела дебљина барутног зрна се током сагоревања мења од 0 до 1 за дегресивне баруте, односно од 0 до u_k за вишеканалне прогресивне баруте.

Такође се, уместо m_z и S_z , уводе две бездимензионе величине на следећи начин. Релативна сагорела маса барута дефинише се према [7]:

$$\psi = \frac{m_{z0} - m_z}{m_{z0}} \quad (5.17)$$

где је:

m_{z0} — почетна маса барутног зрна.

Променљива ψ мења се од 0 до 1 док је релативна сагоревајућа површина барутног зрна:

$$\sigma = \frac{S_z}{S_{z0}} \quad (5.18)$$

где је S_{z0} — почетна површина барутног зрна.

Променљива σ се мења од 1 до σ_k , који представља лимес од σ за услов краја сагоревања.

Ако се дефинише зависност ψ и σ од u , онда важе релације:

$$m_z = m_{z0}(1 - \psi) \quad (5.19)$$

$$S_z = \sigma S_{z0} \quad (5.20)$$

Зависност ψ од u добија се на следећи начин: Ако у елементарној контролној запремини W важи геометријски закон сагоревања, онда је [7]:

$$\begin{aligned} m_{z0} &= \rho_b W_{z0} \\ m_z &= \rho_b W_z \end{aligned} \quad (5.21)$$

где је:

W_{z0} - почетна запремина једног барутног зрна а

W_z - тренутна запремина једног барутног зрна.

Из (5.17) тада следи:

$$\psi = \frac{W_{z0} - W_z}{W_{z0}} \quad (5.22)$$

Параметар f који дефинише утицај површинских сила на граници двеју компонената S_k одређује се експериментално. Ако се вредност за ε на почетку првог периода означи са ε_0 , а тренутна дебљина барутног зрна са $2r_b = 2r_0 - 2r$, тада се, према литератури [7], може написати:

$$f = f^* \frac{1 - \varepsilon}{2r_b} |u - u_b| (u - u_b) \rho \quad (5.23)$$

Овде је:

$$f^* = \begin{cases} 1,75 & \varepsilon < \varepsilon_0 \\ 1,75 \left(\frac{1-\varepsilon}{1-\varepsilon_0} \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \right)^{0,45} & \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_1 \\ 0,3 & \varepsilon_1 < \varepsilon \leq 1 \end{cases} \quad (5.24)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{1 + 0,02 \frac{1-\varepsilon_0}{\varepsilon_0}} \quad (5.25)$$

Количина топлоте која се утроши на загревање барутног зрна (q) врло мало утиче на резултате прорачуна. С обзиром на то да је њено одређивање доста компликовано, а с друге стране несигурно, то ће се у овом материјалу сматрати да је $q = 0$ [7].

5.3. Програмско решење УБ прорачуна методом двофазног струјања

При унутрашње-балистичком прорачуну двофазним струјањем сам процес опаљења се посматра на исти начин као и при прорачуну методом Дроздова с тим да су полазне претпоставке другачије. Оваквим приступом посматра се реалнија слика процеса опаљења и за очекивати је да ће резултати прорачуна бити ближи стварним подацима са полигонских испитивања. За потребе УБ прорачуна заснованог на теорији двофазног струјања у софтверу *FORTRAN* састављен је програмски код 'UBLAGR30PRAGA' (Прилог 3). Он је базиран на математичком моделу двофазног струјања и врши решавање лагранжовог система једначина унутрашње балистике. У улазну датотеку 'POD30PRAGA' уносе се сви релевантни подаци за прорачун. Полазни подаци су делом унапред задати, а оне величине које се подударају са полазним подацима за УБ прорачун методом Дроздова су искоришћене у циљу касније компаративне анализе.

У табели 5.1 су приказани полазни подаци УБ прорачуна теоријом двофазног струјања.

Табела 5.1 Полазни подаци двофазног УБ прорачуна

Назив	Ознака	Вредност	Јединица
Запреминска маса барута	ρ_b	1600	kg/m^3
Почетна дебљина барутног зрна	r_b	0,000405	m
Почетна маса барутног зрна	m_{z0}	$1,55412 \cdot 10^{-5}$	kg
Почетна површина барутног зрна	S_{z0}	$2,97823 \cdot 10^{-5}$	m^2
Коволумен барутних гасова	α	0,001015787	m^3/kg
Коефицијент облика „капа“	κ	1,24179	/
Коефицијент облика „ламда“	λ	-0,19471	/
Коефицијент облика „ми“	μ	0	/
Специфична топлота при константном притиску	c_p	1620	J/kgK
Специфична топлота при константној запремини	c_v	1300	J/kgK
Јединична брзина сагоревања	u_{z0}	$7,377796 \cdot 10^{-10}$	m/sPa
Почетна температура барутног зрна	T_{b0}	288	K
Коефицијент прелаза топлоте	λ_b	0,222	W/mK
Почетна маса барута	m_b	0,195	kg
Коефицијент динамичке вискозности	η	0,0135	sPa
Порозност на почетку првог периода	ε_0	0,6212	/
Густина барутних гасова на почетку првог периода	ρ_0	31,311907	kg/m^3
Енергија барутних гасова на почетку првог периода	e_0	$3,76829 \cdot 10^6$	J/kg
Унутрашња енергија барута	e	$3,76829 \cdot 10^6$	J/kg
Притисак форсирања	p_0	$3 \cdot 10^7$	Pa
Почетни положај пројектила	X_0	0,422	m
Укупна дужина унутрашњости цеви	X_u	2,482	m
Попречни пресек цеви	S	0,000738	m^2
Маса пројектила	m	0,435	kg
Пут пламена на почетку првог периода	r_{b0}	0,0000101979	m
Време претходног периода	t_0	$6,216 \cdot 10^{-5}$	s
Број тачака по променљивој „S“	n	30	/
Почетни коефицијент провођења топлоте	α_0	5,8	W/mK
Максималан корак по времену	h_{tmax}	0,00001	s

Након компајлирања програма и покретања апликације врши се генерисање излазних датотека 'IZL30PRAGA' и 'GRAF30'. Оне садрже податке о следећим величинама:

- времену t [ms];
- путу, односно положају сегмената цеви у сваком тренутку X [cm];
- густини у свим сегментима цеви ρ [kg/m³];
- брзини кретања честица несагорелих барутних зрна u_b [m/s];
- брзини кретања барутних гасова u [m/s];
- унутрашњој енергији барута e [MJ/kg] и о
- притиску барутних гасова p [bar].

У сваком временском интервалу простор у цеви оруђа иза пројектила подељен је на 30 једнаких сегмената за које су срачунате вредности свих параметара. Из њих се читавају вредности свих жељених величина. На пример, уколико је потребно проверити почетну брзину пројектила на устима цеви, посматрао би се сегмент најближи пројектилу у последњој временској итерацији. Као параметар који може дати приближну брзину пројектила, посматрала би се брзина струјања барутних гасова јер је у том тренутку само она преостала. Уколико је потребно одредити максимални притисак б/г мора се унакрсно тражити и по временским интервалима и по сегментима.

Сходно резултатима УБ прорачуна методом двофазног струјања за средство аутоматски топ 30 *mm*, посматраће се величине у карактеристичним временским интервалима и то у:

- 1) почетном тренутку (на почетку сагоревања),
- 2) у тренутку достизања максималног притиска,
- 3) на крају првог периода, односно на крају сагоревања барута и
- 4) на крају другог периода, односно у тренутку наилаaska дна пројектила на уста цеви.

Табеларно ће бити приказане вредности свих излазних величина у карактеристичним моментима и пресецима. Све величине које се односе на сегмент цеви најближи дну цеви носиће индекс „ d “, док ће све величине које се односе на сегмент цеви најближи пројектилу носити индекс „ p “.

У табели 5.2 приказани су притисци, брзина струјања барутних зрна и барутних гасова, унутрашња енергија и густина барута и то за кључне временске тренутке и пресеке.

Табела 5.2 *Притисак барутних гасова у карактеристичним тачкама*

Ознака	Јединица	Почетак сагоревања	Максимални притисак	Крај сагоревања	Пројектил на устима цеви
p_d	<i>bar</i>	335	2914	2049	762
p_p	<i>bar</i>	334	2580	1816	713
u_{bd}	<i>m/s</i>	0	0	0	0
u_{bp}	<i>m/s</i>	2,7	412,6	737,8	0
u_d	<i>m/s</i>	0	0	0	0
u_p	<i>m/s</i>	2,7	412,6	737,8	995,3
e_d	<i>MJ/kg</i>	3,768	3,393	3,028	2,49
e_p	<i>MJ/kg</i>	3,767	3,4	3,041	2,527
ρ_d	<i>kg/m³</i>	34,83	257,57	214,9	110,42
ρ_p	<i>kg/m³</i>	34,78	234,79	194,68	102,69

Из резултата прорачуна се види да притисак барутних гасова своју највишу вредност од 2914 *MPa* достиже у току сагоревања барута и то у сегменту најближем дну цеви. Штавише, прорачуном је потврђено да је у току целокупног процеса опаљења притисак б/г виши на дну цеви него уз дно пројектила. Брзина барутних гасова и барутних зрна једнака је нули уз дно цеви док је у сегменту најближем пројектилу једнака брзини пројектила. Њена највећа вредност је 995,3 *m/s*. Унутрашња енергија барута се у току процеса сагоревања као и целокупног процеса опаљења смањује јер се претвара у друге видове енергије. Сходно томе се врше радови на савладавању отпора (урезивање водећег прстена, покретање пројектила и барутних гасова, савладавање трења и тд.). Највећа вредност густине барута је при достизању максималног притиска б/г.

6. ДИМЕНЗИОНИСАЊЕ ЦЕВИ ТОПА 30mm

Димензионисање цеви представља једну етапу у процесу пројектовања цеви. Циљ димензионисања цеви је остваривање довољне дебљине зида цеви тако да се при процесу опаљења ни у једном тренутку не прекорачи напон течења материјала. Сходно типу цеви се најпре врши успостављање релација за еластичну отпорност цеви на основу неке од теорија чврстоће цеви. Након тога се на основу притиска барутних гасова у цеви креира крива прорачунског притиска. Применом коефицијената сигурности се добија коначан изглед цеви који треба да обезбеди њену постојаност. У даљем делу ће се описати све фазе при димензионисању цеви.

6.1. Математички модел еластичне отпорности цеви

Посматрајући геометрију цеви оруђа уочава се да су оне дебелозидни цилиндри. Код њих је однос спољашњег (r_2) према унутрашњем (r_1) радијусу у границама $a_{21} = r_2/r_1 \geq 1,2 \div 2$. С обзиром да се цеви у току процеса опаљења излажу изузетно високим притисцима који се не јављају код осталих топлотних машина, прорачун отпорности цеви оруђа се разликује од прорачуна танкозидних цеви и љуски, котлова, резервоара и сличних делова који се оптерећују на унутрашњи или спољашњи притисак [8].

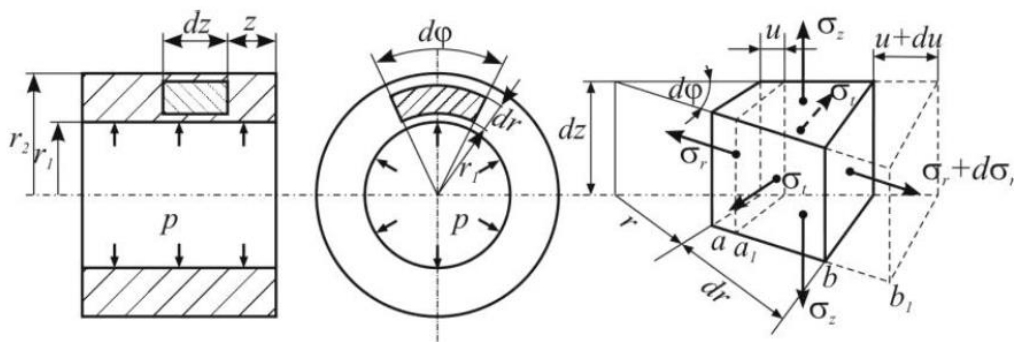
Отпорност цеви зависи од максималних напрезања и деформација које се јављају као последица деловања сила на цев. Основна сила од које зависе деформације и напрезања је сила притиска барутних гасова. Сходно томе ће и прорачун отпорности цеви бити изведен у зависности од ове силе. У општем случају цев је у току процеса опаљења изложена сложену стању напрезања која узрокују сложене деформације. Оне се могу разврстати на: радијалне, тангентијалне и аксијалне.

Апсолутне деформације у смеру главних оса и одговарајуће релативне деформације су [8]:

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

Појавом деформација у зиду цеви долази до појаве њима одговарајућих напрезања σ_r , σ_t и σ_z и одговарајућа изведена или еквивалентна напрезања $E\varepsilon_r$, $E\varepsilon_t$ и $E\varepsilon_z$.

Како би се одредиле деформације у зиду цеви, разматра се елементарни исечак материјала цеви у облику цилиндра са полупречницима r и $r + dr$, приказаним на слици 6.1. Овај прстен, под деловањем унутрашњег притиска p , трпи слободну деформацију.



Слика 6.1 Шема напрезања и деформација цеви [8]

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

$$\overline{a_1 b_1} - \overline{ab} = (dr + u + du) - (u + dr) = du \quad (6.1)$$

Релативна радијална деформација биће једнака:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr} \quad (6.2)$$

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

$$\varepsilon_r = \frac{2\pi(r+u) - 2\pi r}{2\pi r} = \frac{u}{r} \quad (6.3)$$

По истој аналогiji релативна аксијана деформација биће:

$$\varepsilon_z = \frac{dw}{dr} \quad (6.4)$$

Како би се одредила зависност између ε_r и ε_t , диференцира се ε_t по независно променљивој r , па је:

$$\frac{d\varepsilon_t}{dr} = \frac{d}{dr} \left(\frac{u}{r} \right) = \frac{1}{r} \left(\frac{du}{dr} - \frac{u}{r} \right) = \frac{1}{2} (\varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (6.5)$$

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

На елемент слоја са слике 6.1, нормално на његове површине делују еластичне силе које га држе у равнотежи. Уколико се ове силе пројектују на правац радијуса, добија се:

$$(\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)d\varphi dz - \sigma_r r d\varphi dz - 2\sigma_t dr dz \sin \frac{d\varphi}{2} = 0 \quad (6.6)$$

С обзиром на то да су правци деловања напрезања σ_r и σ_z у смеру одговарајућих оса, тангенцијална (или ободна) напрезања σ_t су она чији правац лежи у тангенти на круг прстена цеви [8].

6.2. Еластична отпорност моноблок цеви

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

И поред тога што су познате вредности максималних променљивих напрезања σ_t и σ_r по слојевима цеви оруђа при опаљењу, није једноставно утврдити и доказати преко којих вредности ових максимума може доћи до појаве трајних деформација. Другим речима, колика је еластична отпорност моноблок цеви. Експериментима је доказано да је за дефинисање тог граничног стања, поред интензитета главних напрезања, потребно познавати и њихове међусобне односе, поготово ако се узме у обзир сложено троосно стање напрезања цеви као и већи број могућих комбинација тих односа [8].

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

Неке од најпознатијих теорија чврстоће су [8]:

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

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

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

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

3) Критеријум највећих тангенцијалних напрезања (Кулона и Треска)

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

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

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

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

4) Критеријум енергије промене облика (ХМХ)

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

Ако важи Хуков закон, специфична енергија деформације може се изразити као збир специфичних енергија промене запремине тела и специфичне енергије промене облика тела [8].

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

$$(\sigma_t - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_t)^2 = 2\sigma_e^2 \quad (6.7)$$

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

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

$$\sigma_{t1}^2 - 2\sigma_{t1}\sigma_{r1} + \sigma_{r1}^2 + \sigma_{r1}^2 + \sigma_{t1}^2 = 2\sigma_e^2 \quad (6.8)$$

или

$$\sigma_{t1}^2 - \sigma_{t1}\sigma_{r1} + \sigma_{r1}^2 = \sigma_e^2 \quad (6.9)$$

Уколико се у претходни израз уврсте изрази за σ_{t1} и σ_{r1} , после сређивања израза се добија релација за еластичну отпорност моноблок цеви по ХМХ теорији која гласи [8]:

$$p_{1gr}^{IV} = \sigma_e \frac{a_{z1}^2 - 1}{\sqrt{3a_{z1}^4 + 1}} \quad (6.10)$$

Овај критеријум чврстоће је у потпуном складу са експерименталним резултатима, посебно за танкозидне цеви и сматра се потпунијим у односу на претходне, али су прорачуни на бази ове теорије гломазнији. У последње време се овај критеријум заједно са критеријумом Сен Венана најчешће користи у пракси при дефинисању еластичне отпорности моноблок цеви. ХМХ теорија је примењена у програмском решењу при прорачуну пројектовања моноблок цеви, односно одређивању криве прорачунског и конструкционог притиска цеви, као и при анализи тако конструисане цеви методом коначних елемената у *FEMAP* софтверу.

6.3. Коефицијент сигурности цеви

Један од примарних задатака при пројектовању и производњи цеви оруђа огледа се у обезбеђивању поуздане чврстоће цеви. Новопроектвана цев треба да обезбеди отпорност при потпуном хабању, за све брзине гађања и при било ком режиму ватре. Потребно је да задржи своју постојаност при било којим реалним температурним условима и да обезбеди правилно урезивање водећег прстена и вођење пројектила чак и када је недовољно очишћена и подмазана. Цев треба да остане у подручју еластичних деформација при свим дозвољеним одступањима у маси барутног пуњења пројектила [8].

Коефицијент сигурности цеви n представља однос:

$$n = \frac{p_{1gr}}{p_b} \quad (6.11)$$

где су: p_{1gr} — граница еластичне отпорности цеви (према теоријама чврстоће) и

p_b — балистички притисак (према УБ прорачуну).

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

Сходно бројним експерименталним испитивањима се за карактеристичне пресеке цеви, при њеном прорачуну, препоручују минималне вредности коефицијената и то [8]:

- за пресек у пределу барутне коморе коефицијент сигурности се креће у границама $n_k = 0,8 \div 0,9$ (уколико се не урачуна отпорност делова спојених са цеви као што су задњак, навртка цеви, омотач цеви и сл.). У противном 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 $n_{o\check{z}} \leq 1,2 \div 1,3$.
- за пресеке у области уста цеви, коефицијент сигурности је највећи и не сме бити мањи од $n_u \geq 1,9$.

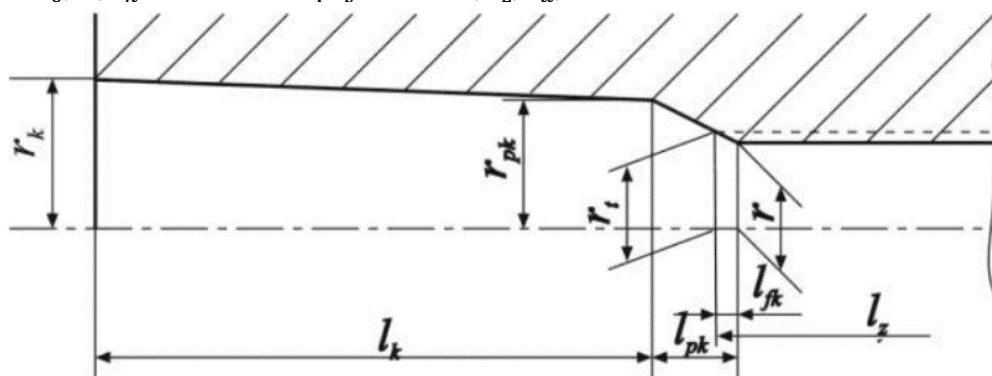
Овакво повећање обезбеђује потребну дебљину зида цеви због конструктивних разлога (уградња гасних уређаја и слично) или због захтева експлоатације. Величине коефицијената сигурности препоручују се углавном за теорију највећих релативних деформација и практично су утврђени на основу дугогодишњег искуства и примене ове теорије у пракси. Теорија чврстоће ХМХ је у примени релативно млађа и због тога за њу не постоје још увек тачно испитане и утврђене вредности коефицијената сигурности. Због тога се, без велике грешке, за њу могу усвојити вредности коефицијената сигурности цеви како су дати за другу теорију чврстоће.

6.4. Методологија прорачуна моноблок цеви на чврстоћу

Поступак пројектовања моноблок цеви подразумева тачно дефинисање унутрашње трасе цеви, тј. облик и димензије барутне коморе, водишта пројектила и спољне трасе цеви. При томе се мора обезбедити максимално задовољење тактичко-техничких захтева (ТТЗ) за цев.

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

За обликовање канала цеви полазни подаци су резултати УБ прорачуна за барутну комору: W_0 , x , l_k и водиште пројектила d , l_z , l_u , слика 6.2.



Слика 6.2 Изглед барутне коморе и прелазног конуса [8]

Ознаке на слици 6.2 су следеће:

W_0 – почетна запремина барутне коморе,

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

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

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

l_k – дужина барутне коморе,

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

l_{pk} – дужина прелазног конуса,

$$W_{pk} = \frac{\pi}{3} l_{pk} (r_{pk}^2 + r_t^2 + r_{pk} r_t) \quad (6.12)$$

W_{pk} – запремина прелазног конуса

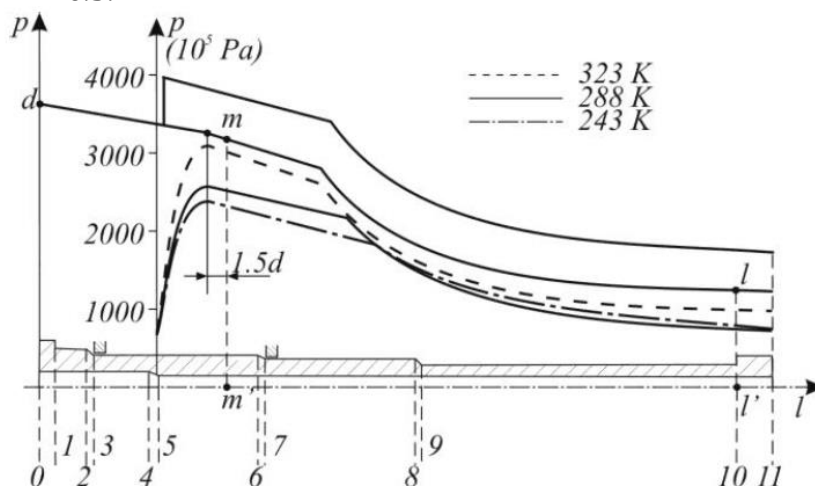
Осим тога, при дефинисању спољне трасе цеви r_2 мора се узети у обзир следеће:

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

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

6.5. Поступак пројектовања моноблок цеви

У погодној размери нацрта се уздужни пресек цеви и одреди почетна позиција пројектила, слика 6.3.



Слика 6.3 Крива конструкционог притиска [8]

Преко УБ прорачуна се одреде криве промене притиска барутних гасова на дно пројектила $p(l)$ при температурама пуњења од 323К, 288К и 243К и конструише крива највећег притиска. Ова крива пролази кроз тачке $p_m(323)$, $p_k(323)$, $p_k(288)$, $p_k(243)$ и $p_u(323)$ [8].

Одређује се крива „обвојница“ притиска барутних гасова на зидове цеви према [8]:

- тачка $p_m(323)$ помера се за $1,5d$ према устима цеви и тако добија тачка m .
- Одређује се највећи притисак на дно коморе (дно чауре) p_{dm} и добија се тачка d према:

$$p_{dm} = p_{pm} \left(1 + \frac{m_b}{2m} \right) \quad (6.13)$$

где су: p_{pm} — максимални притисак гасова на дно пројектила,

m_b — маса барутног пуњења и

m — маса пројектила.

Тачка m спаја се правом линијом до тачке d .

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

Крива $dmlk$ представља криву обвојницу највећег притиска гасова на зидове цеви. У даљем поступку одређује се крива пожељне отпорности цеви, односно крива тзв. Конструкционог притиска.

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

- За пресек барутне коморе усваја се $n_k = 1,0$.
- Од почетка ожљебљеног дела водишта цеви до тачке m усваја се [8]:
 $n = 1,2$ за дубину жљеба $t = 0,01d$,
 $n = 1,3$ за дубину жљеба $t = 0,02d$.
- Помери се од уста цеви за дужину $2d$ (тачка l) и до краја пресека цеви усваја $n_u = 1,9$.
- На делу цеви између тачака m и l , коефицијент чврстоће се мења линеарно по закону:
 $n_i = 1,2 + 0,7 \frac{x_i}{m'l'}$ за дубину жљеба $t = 0,01d$ и
 $n_i = 1,3 + 0,7 \frac{x_i}{m'l'}$ за дубину жљеба $t = 0,02d$,

где су: x_i — растојање од тачке m до посматраног пресека,

$m'l'$ — растојање одсечка између m' и l' .

После дефинисања криве конструкционог притиска $p_k(l)$ дефинише се материјал за израду цеви. Уколико је материјал за израду цеви познат (величина границе еластичности материјала σ_e је дата), онда се из услова за гранични притисак по теорији највећих релативних тангенцијалних деформација на унутрашњем радијусу p_{1gr}^{II} прорачунски одређују спољшњи полупречници цеви r_2 у појединим пресецима:

$$r_{2i} = r_{1i} \sqrt{\frac{3\sigma_e + 2p_{1k}}{3\sigma_e - 4p_{1k}}} \quad (6.14)$$

Све вредности за r_{2i} заокружују се до 5 mm на већу вредност. Прорачунати спољни полупречник r_2 у пределу уста цеви (на делу дужине $2d$) треба повећати за (5-6) mm, уколико оруђе има гасну кочницу на устима цеви [8].

У случајевима када материјал цеви није познат, онда се према услову за границу еластичне отпорности цеви одређује [8]:

$$\sigma_e = \frac{2}{3} p_{bm} \frac{2a_{21}^2 + 1}{a_{21}^2 - 1} \quad (6.15)$$

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

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

p_{bm} — највећи балистички притисак (p_{dm}).

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

$$r_2 = r_{km} \sqrt{\frac{3\sigma_e + 2p_{bm}}{3\sigma_e - 4p_{bm}}} \quad (6.16)$$

где је r_{km} — највећи радијус барутне коморе.

Коначно дефинисање спољне трасе цеви, којим су уважени захтеви у погледу вођења цеви за време трзања и враћања у клизачима колевке, затим повећање пречника на задњем пресеку због везе цеви са задњаком, додатак за везу цеви са ГК и сл., подразумева коначни облик спољне трасе цеви која је дефинисана стварним полупречницима r_{2sbr} . На основу тога се одређује стварна еластична отпорност моноблок цеви p_{1gr}^{I-IV} према усвојеној теорији чврстоће цеви, за сваки попречни пресек цеви, где се мења спољни или унутрашњи радијус цеви.

Стварни гранични притисак (еластична отпорност цеви) не сме бити мањи од очекиваног граничног притиска (или крива пожељне отпорности цеви) p_{1k} . Стварни коефицијент сигурности цеви у појединим пресецима одређује се као однос стварне еластичне отпорности p_{1gr}^{I-IV} и p_{bm} [8]:

$$n_i = \frac{p_{1gr}^{I-IV}}{p_{bm}} \quad (6.17)$$

6.6. Програмско решење за димензионисање цеви топа 30 mm

У циљу поједностављенијег приступа димензионисању цеви и решавању математичког модела, развијен је код у програмском језику *FORTRAN*. Ово програмско решење нуди могућност прорачуна за четири основне теорије чврстоће цеви уз могућност прорачуна практично димензионисане цеви. У случају ојачане цеви врши се посебан прорачун димензионисања. Програмско решење се састоји од (Прилог 4):

- главног програма (KODCEV),
- две датотеке улазних података (UBPX30 и ULUB30) и
- четири излазне датотеке (POM, POS, IDACE и IDACEV).

Димензионисање цеви се може извршити тек када су познати полазни подаци. Ту спадају подаци о карактеристикама пројектила и барутног пуњења (маса пројектила и маса барутног пуњења), о унутрашњој траси цеви (геометрија канала цеви) о материјалу цеви (израженом преко напона течења) и подаци из УБ прорачуна. У зависности од намене средства одређује се да ли је потребно извршити ојачање цеви или не. У овом случају није предвиђено ојачање.

У табели 6.1 наведени су полазни подаци улазне датотеке „ULUB30“ неопходни за димензионисање цеви.

Табела 6.1 Полазни подаци за димензионисање цеви

Назив	Ознака	Вредност	Јединица
Запремина барутне коморе	W_0	0,000311765	m^3
Површина попречног пресека барутне коморе	S_k	0,001698	m^2
Површина попречног пресека канала цеви	S	0,000738	m^2
Пречник канала цеви у пределу коморе	d_k	0,0465	m
Калибар цеви	d	0,03	m
Маса барутног пуњења	m_b	0,195	kg
Маса пројектила	m	0,435	kg
Граница еластичности (напон течења)	σ_e	$100 \cdot 10^7$	Pa
Ојачање цеви (0 је ојачана, 1 је неојачана)	aut	1	/
Теорија чврстоће	$meto$	4	/

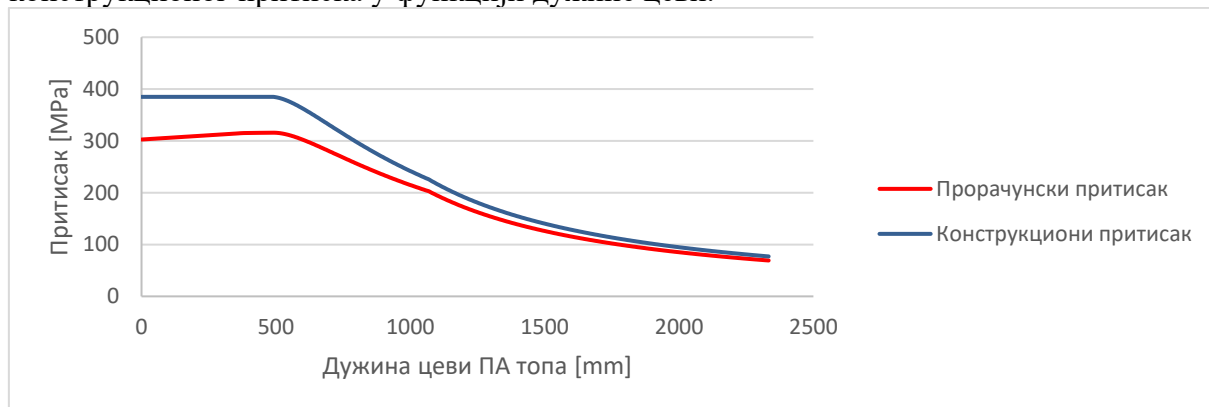
За избор теорије чврстоће су коришћене ознаке 0, 1, 2, 3 или 4 са следећим значењем:

- 0 – практично димензионисана цев,
- 1 – димензионисање цеви по првој теорији чврстоће (критеријум највећих нормалних напрезања),
- 2 – димензионисање цеви по другој теорији чврстоће (критеријум највећих линеарних деформација),
- 3 – димензионисање цеви по трећој теорији чврстоће (критеријум највећих тангенцијалних напрезања) и
- 4 – димензионисање цеви по четвртој теорији чврстоће (критеријум највеће енергије промене облика – ХМХ).

Подаци о узајамној зависности релативно сагореле масе барута, пређеног пута пројектила и притиска барутних гасова потребни су за улазну датотеку „UBPX30“. Они су добијени оптималним решењем УБ прорачуна методом Дроздова и приказани у претходном сегменту мастер рада.

Покретањем програма се на основу улазних података најпре формира крива прорачунског притиска. Након тога се применом коефицијената сигурности дефинише крива конструкционог притиска. Тиме се обезбеђује поузданост коришћења цеви и на неки начин анулира утицај свих параметара који нису директно унети а утичу на смањење чврстоће цеви. На крају се рачунају спољашња и унутрашња траса цеви, односно спољашњи (r_2) и унутрашњи (r_1) полупречник цеви. Ови подаци се исписују у излазну датотеку где се датотека „POS“ односи на зависност конструкционог притиска у функцији дужине цеви а датотека „ROM“ на прорачунски притисак у функцији дужине цеви. Датотека „IDACE“ садржи податке о геометрији цеви (r_1 и r_2) и конструкционом притиску у функцији дужине цеви.

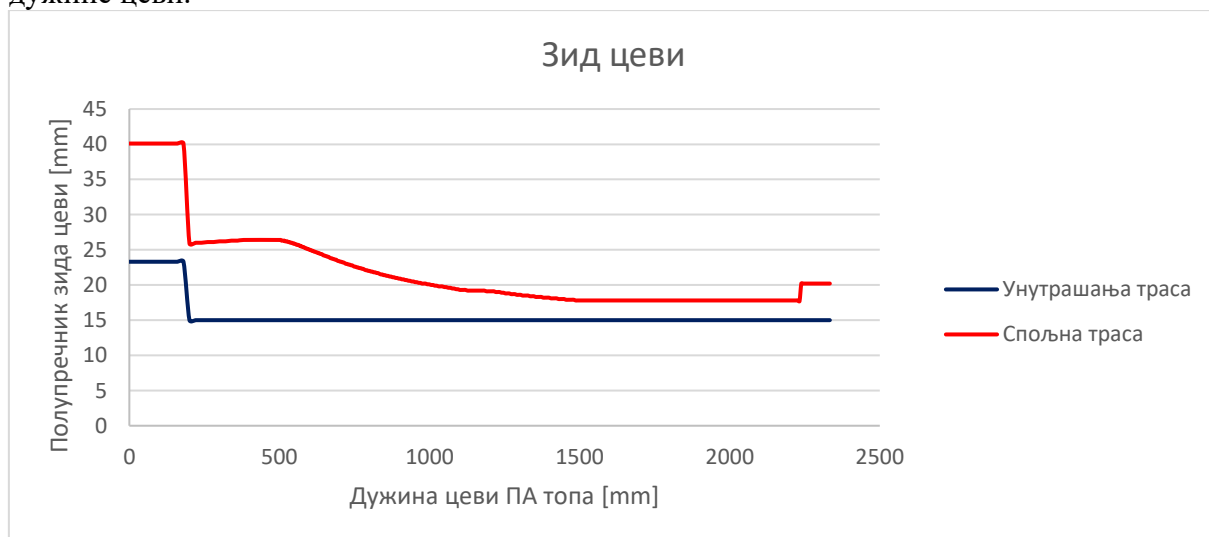
На слици 6.4 приказан је упоредни дијаграм зависности прорачунског и конструкционог притиска у функцији дужине цеви.



Слика 6.4 Упоредни приказ прорачунског и конструкционог притиска

Са претходног дијаграма може се уочити да је конструкциони притисак дуж целе цеви већи од прорачунског притиска због урачунатих степена сигурности. Максимални притисак барутних гасова од $p_{max} = 31,6 \text{ MPa}$ достиже се након пређених 217 mm. Када се на то дода дужина барутне коморе од $X_k = 183 \text{ mm}$ добија се дужина цеви која је оптерећена максималним притиском $L_f(p_{max}) = 400 \text{ mm}$. На овој дужини цеви делује максимални притисак барутних гасова али се на то додаје дужина од три калибра, односно 90 mm и то из потребе обезбеђења оних делова цеви непосредно испред зоне максималног притиска. Како би се обезбедила постојаност цеви у овом подручју, у дужини од 490 mm од дна цеви, конструкциони притисак се изједначава са својом максималном вредношћу, што је на дијаграму приказано као хоризонтална линија. У даљем делу цеви конструкциони и прорачунски притисци опадају, што одговара смањењу притиска б/г у цеви са кретањем пројектила.

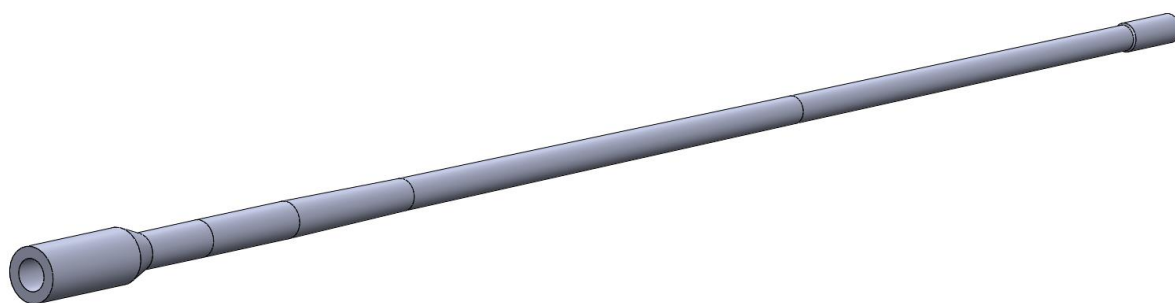
На слици 6.5 приказан је дијаграм спољашње и унутрашње трасе цеви у функцији дужине цеви.



Слика 6.5 Приказ контуре зида цеви

На претходном дијаграму јасно се уочавају контуре зида цеви. Унутрашња траса је конструисана на основу улазних параметара при димензионисању цеви. Спољашња траса цеви је конструисана на основу криве конструктивног притиска. Сагласно тој криви, у подручју зоне максималног притиска спољашња траса цеви задржава подједнако растојање у односу на унутрашњу трасу цеви. Након тога, идући ка устима цеви, долази до смањивања дебљине зида. За потребе монтирања додатних уређаја на уста цеви, врши се повећање дебљине зида цеви у дужини навоја за везу са уређајем. Тиме је у потпуности дефинисан профил попречног пресека цеви.

На основу контуре спољашње и унутрашње трасе цеви у 3Д софтверу *SOLIDWORKS* измоделирана је цев топа. Ова цев је упрошћена у односу на већ постојећу цев противавионског топа 30/2 mm M53/59. На слици 6.6 дата је новопроекттована цев калбра 30 mm у изометријском приказу.



Слика 6.6 *Изометријски приказ новопроекттоване цеви*

7. АНАЛИЗЕ РЕЗУЛТАТА ПРОРАЧУНА У ПРОЦЕСУ ПРОЈЕКТОВАЊА ЦЕВИ ТОПА 30 mm

Како би се извршила оптимизација процеса пројектовања цеви неопходно је сагледати целокупан процес пројектовања и проценити које су методе УБ прорачуна најподобније за коришћење. При тиме се међусобно пореде таблична, аналитичка и нумеричка метода. Такође је потребно извршити поређење са вредностима за већ постојеће средство противавионски топ 30/2 mm М-53/59. Тежи се да почетна брзина пројектила буде што већа а максимални притисак барутних гасова што нижи. Испројектовану цев потребно је неким софтвером за прорачун методом коначних елемената испитати на унутрашње напоне и деформације. Проверава се да ли је у неком тренутку процеса опаљења дошло до прекорачења напона течења материјала цеви и да ли деформације цеви остају у малим вредностима. Сходно томе се пружа увид у могућности даље оптимизације и смањења масе цеви.

7.1. Компаративна анализа табличне и аналитичке методе УБ прорачуна

Уколико се размотри таблична метода УБ прорачуна Слухоцког и аналитички УБ прорачун методом Дроздова очигледно је да методе нису компатибилне у свим сегментима. Таблична метода се примењује да би се пројектовали најзначајнији параметри цеви и процеса опаљења, а на основу масе пројектила, масе барутног пуњења и почетне брзине пројектила. За разлику од ње, аналитичка метода се користи само за прорачун параметара процеса опаљења, попут притиска б/г, брзине пројектила и тд. Конструкциони подаци цеви су унапред задати за аналитичку методу. Код табличне методе се прорачун врши уз коришћење емпиријски састављених табела док се код аналитичке методе врши решавање система основних једначина унутрашње балистике. У табели 7.1 је дат упоредни приказ резултата прорачуна компатибилних карактеристика за табличну и аналитичку методу. При томе су изнети подаци за оптималну варијанту УБ прорачуна аналитичком методом.

Табела 7.1 Упоредни приказ резултата УБ прорачуна табличном и аналитичком методом

Карактеристика	Ознака	Јединица мере	Таблична метода	Аналитичка метода	Разлика вредности у %
Почетна брзина пројектила	V_0	m/s	997	1013	1,6
Највећи притисак б/г	p_m	MPa	328	316	3,7
Дужина цеви	L_c	mm	2103	2482	15,3
Дужина водишта пројектила	X_u	mm	1561	2060	24,2
Дужина барутне коморе	X_{kom}	mm	244	422	42,1
Маса барутног пуњења	m_b	kg	0,212	0,195	8
Коефицијент фиктивности	φ	/	1,309	1169	10,7

Из претходне табеле се уочава да се највећа почетна брзина добија аналитичком методом док се највећи притисак б/г добија табличном методом. Код аналитичке методе се дужина барутне коморе разматра као фиктивна, па је цев дужа него код табличне методе.

Маса барутног пуњења је већа код табличне методе јер је извршена оптимизација почетног барутног пуњења. На основу свега наведеног може се закључити да је подобнија аналитичка метода јер се остварује нижи притисак б/г у цеви и већа почетна брзина пројектила, али се примењује дужа цев.

7.2. Компаративна анализа резултата УБ прорачуна аналитичком методом са вредностима већ постојећег средства

Како би се оценила аналитичка метода, односно метода Дроздова, неопходно је резултате оптималног УБ прорачуна упоредити са вредностима компатибилних параметара већ постојећег средтва. То средство је противавионски топ 30/2 mm М-53/59. У табели 7.2 је дат упоредни приказ резултата прорачуна аналитичком методом и компатибилних података за већ постојеће средство.

Табела 7.2 Упоредни приказ резултата УБ прорачуна аналитичком методом и већ постојећих вредности

Карактеристика	Ознака	Јединица мере	Аналитичка метода	Постојеће вредности	Разлика вредности у %
Почетна брзина пројектила	V_0	m/s	1013	1000	1,3
Највећи притисак б/г	p_m	MPa	316	350	9,7
Дужина цеви	L_c	mm	2482	2190	11,8
Дужина водишта пројектила	X_u	mm	2060	1985	3,6

Из претходне табеле се може видети да је почетна брзина пројектила већа при прорачуну аналитичком методом него код постојећег средтва. Прорачунати максимални притисак је нижи него код постојећег средтва. Цев је нешто дужа код прорачуна аналитичком методом јер се код ње дужина барутне коморе разматра као фиктивна, док се код већ постојећег средтва она разматра као стварна. На основу приказаних резултата се може закључити да метода Дроздова има оптималније вредности кључних параметара у односу на већ постојеће средство.

7.3. Компаративна анализа нумеричке и аналитичке методе УБ прорачуна

Када се говори о методи Дроздова и методи двофазног струјања могуће је наћи доста заједничких претпоставки али и ограничења. На пример обе методе подразумевају да се процес опаљења посматра од тренутка покретања пројектила. Претходни период се рачуна само у циљу утврђивања полазних података и покретање пројектила се сматра тренутним. Вредност притиска форсирања се углавном за артиљеријска оруђа а за потребе прорачуна усваја као 30 MPa . На почетку процеса у обе методе се сматра да је барут хомогено распоређен у барутној комори. Први период траје од покретања пројектила до краја сагоревања барутних зрна, док други период траје од краја сагоревања барута до тренутка када пројектил својим дном досегне уста цеви и напусти цев. Координатни систем се код Методе Дроздова везује за дно пројектила док се код методе двофазног струјања може прилагођавати.

Метода Дроздова је аналитичка а метода двофазног струјања нумеричка. Главна разлика између ове две методе је то што Дроздов користи средњи притисак барутних гасова док се код методе двофазног струјања разматра промена притиска од дна цеви ка дну пројектила у току целокупног процеса опаљења. Због тога се при почетном положају пројектила простор између дна пројектила и дна цеви подели на произвољан број једнаких делова који се касније са покретањем пројектила шире тако да је и на крају процеса опаљења исти број сегмената и налазе се на подједнаким растојањима. Метода двофазног струјања ствара доста реалну слику процеса опаљења. Она не само да разматра промену притиска од дна цеви ка дну пројектила већ омогућава праћење појединих фаза барута у току процеса опаљења (чврсте и гасовите). Метода Дроздова је доста упрошћенија од методе двофазног струјања а циљ ове анализе је да се испита теоријско одступање притисака барутних гасова и брзина пројектила за ове две методе, у зависности од времена и пређеног пута пројектила.

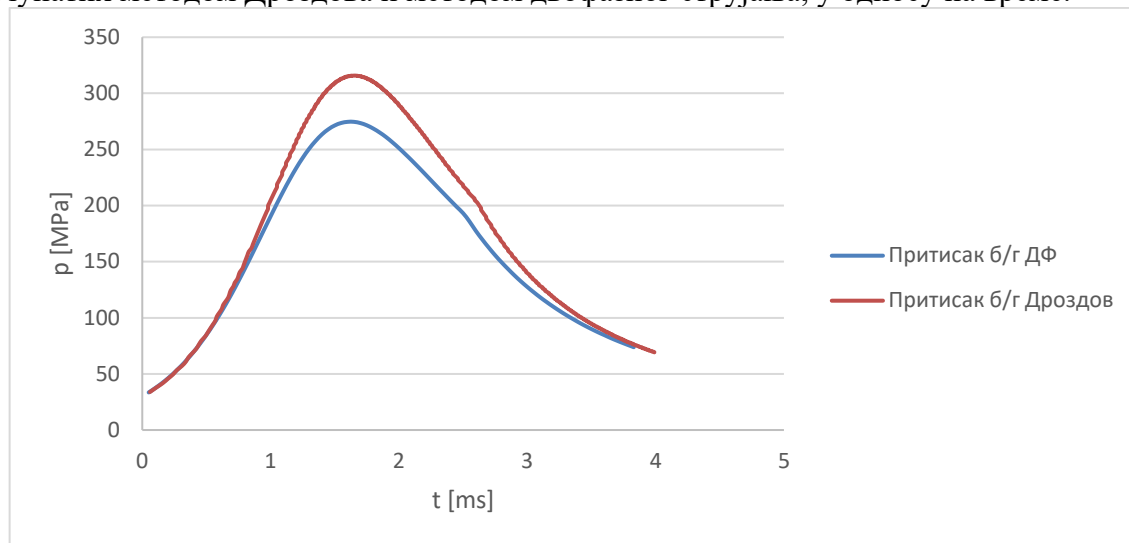
За анализу су узети подаци из оптималног решења при варирању појединих параметара у оквиру прорачуна методом Дроздова. Са овим подацима се пореде притисак барутних гасова и брзина пројектила из прорачуна методом двофазног струјања, такође у зависности од времена и пређеног пута пројектила. Како би поређење било доследно, код резултата прорачуна методом двофазног струјања су вредности притисака барутних гасова између дна цеви и дна пројектила осредњене за све временске интервале. Еквивалент брзини пројектила која се прати код методе Дроздова, у методи двофазног струјања је брзина струјања барутних гасова (гасовите фазе) у сегменту непосредно до дна пројектила. Сматра се да су те честице барутних гасова прилепљене уз дно пројектила и да опонашају његово кретање. Чврста фаза се избегава јер је преко ње могуће пратити кретање пројектила само до краја првог периода.

У табели 7.3 упоредно су приказане вредности брзине пројектила и притиска барутних гасова у карактеристичним тренуцима за обе методе и пређени пут пројектила.

Табела 7.3 Упоредни приказ притиска б/г и брзине пројектила за методе Дроздова и ДФ

Метода	Величина	Ознака	Јединица	Максимални притисак б/г	Крај I периода	Крај II периода
Аналитичка	Притисак	p	MPa	315,8	202,7	69,2
	Брзина	V	m/s	404	776,9	1013
	Пут	X	mm	222	796	2060
Нумеричка	Притисак	p	MPa	274,6	193,2	73,8
	Брзина	V	m/s	413	738	995
	Пут	X	mm	664	1167	2483

На слици 7.1 дат је упоредни приказ зависности притисака барутних гасова, рачунатих методом Дроздова и методом двофазног струјања, у односу на време.

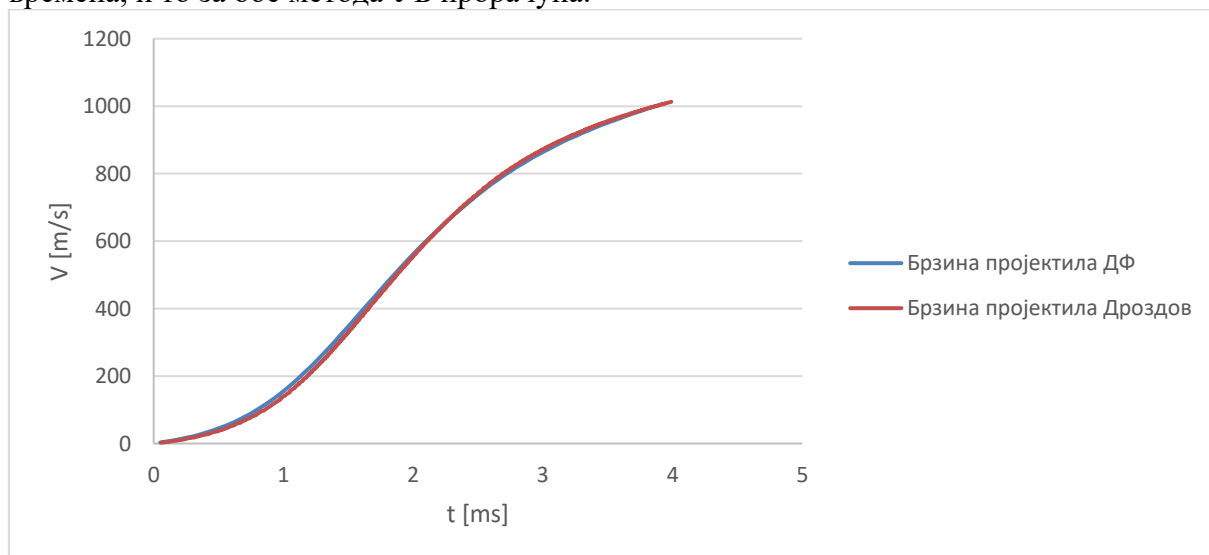


Слика 7.1 Упоредни приказ притисака б/г у функцији времена

На претходном дијаграму може се уочити да су обе методе генерисале криве притисака б/г које су јако сличне. Оне се у својим граничним подручјима скоро подударaju. То значи да се вредност притиска б/г на почетку процеса опаљења рачуната једном методом, тек незнатно разликује од исте величине рачунате другом методом.

Исто важи и за вредности величина рачунатих за крајеве процеса опаљења, односто за уста цеви. Уколико се посматра тренутак достизања максималног притиска тада је одступање притисака највеће. Оно износи 41,2 МПа.

На слици 7.2 приказан је упоредни дијаграм зависности брзине пројектила од времена, и то за обе метода УБ прорачуна.



Слика 7.2 Упоредни приказ брзина пројектила у функцији времена

На претходном дијаграму приказано је готово потпуно преклапање крива промене брзине пројектила у функцији времена, рачунатих методом Дроздова и методом двофазног струјања. Највећа разлика у брзинама огледа се на крају сагоревања барута (I периода) и износи 38,9 m/s.

7.4. Испитивање цеви на напоне и деформације помоћу ФЕМ анализе

Целокупан процес пројектовања цеви аутоматског топа 30 mm прате бројни математички модели и апроксимације које имају за циљ поједностављење самих прорачуна. На тај начин извршена је селекција на најутицајније параметре и на оне мање утицајне. Најутицајнији параметри се уносе у прорачуне у виду полазних података и они представљају основ сваког прорачуна. Мање утицајни параметри се најчешће занемарују или се њихов утицај представља преко одговарајућих коефицијената. Уколико је неку величину тешко измерити или дефинисати математичким моделом обично се врши низ експерименталних испитавања и на основу добијених резултата одређују карактеристични коефицијенти.

Како би се проверила успешност целокупног процеса пројектовања цеви, почев од прорачуна карактеристичних величина методом Слухоцког, затим прорачуна основних УБ параметара методом двофазног струјања и на крају њихове имплементације при димензионисању цеви методом ХМХ, неопходно је извршити анализу новопроектване 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, напрезање и деформације канала цеви услед урезивања водећег прстена у жљебове при кретању пројектила, као и многе друге. У овом случају је испитан утицај притиска барутних гасова на унутрашње напоне и деформације цеви. С обзиром да УБ прорачуном нису добијени подаци о температури барутних гасова, неће се разматрати и анализирати загревање цеви услед преноса топлоте.

Процес опаљења одвија се у делићу секунде. Он је изразито динамичке природе и при томе се развија притисак од преко 300 МПа. Крива притиска барутних гасова је просторно и временски променљива функција. То значи да ће у једном временском тренутку дуж канала цеви дејствовати једна крива притиска да би се већ у наредном тренутку, са покретањем пројектила, ова крива у потпуности изменила. С обзиром да се није дошло до решења овог проблема у виду задавања услова који ће опонашати прорачунату промену притиска, пратиће се промена притиска у карактеристичним тренуцима. Први карактеристични тренутак је достизање максималног притиска барутних гасова. Други случај је тренутак сагоревања последњих барутних зрна, односно завршетак првог периода. Трећи случај је завршетак процеса опаљења, када се пројектил нађе на устима цеви.

При овој анализи потребно је нагласити да је прорачун на напрезања и деформације извршен методом коначних елемената, применом софтвера *FEMAP*. При томе су примењени следећи кораци:

- 1) дефинисање својстава материјала,
- 2) дефинисање модела за прорачун,
- 3) дефинисање мреже коначних елемената
- 4) задавање ограничења,
- 5) задавање оптерећења и
- 6) анализа добијених резултата.

За материјал цеви одабран је челик SINOXX 4732 [9]. При дефинисању материјала се сматра да је он изотропан. Овај легирани челик поседује подобна својства за услове рада при високим притисцима и температурама и има задовољавајућу жилавост.

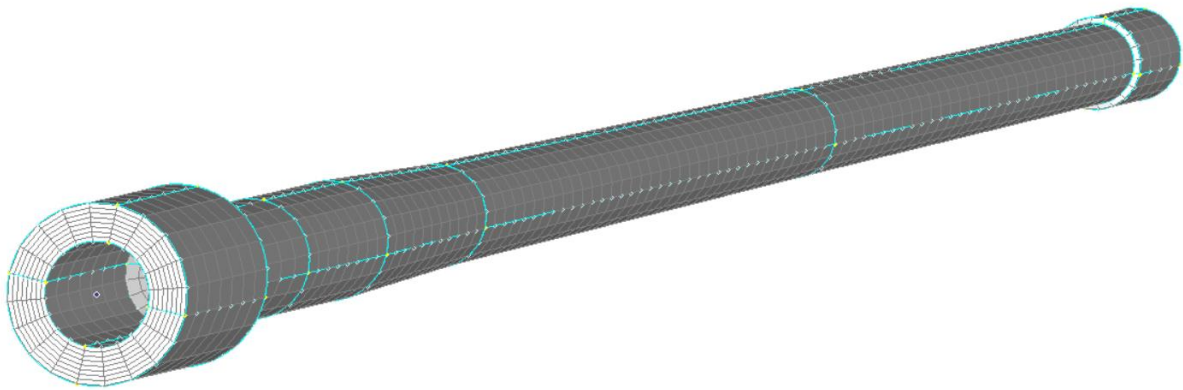
У табели 7.4 наведена су основна својства челика потребна за прорачун и анализу методом коначних елемената.

Табела 7.4 Својства материјала цеви AT 30 mm [9]

Назив	Ознака	Вредност	Јединица
Модул еластичности	E	$2 \cdot 10^5$	MPa
Напон течења (граница еластичности)	R_e	785	MPa
Затезна чврстоћа	R_m	980–1180	MPa
Поасонов коефицијент	ν	0,3	/
Густина материјала	ρ	7700	kg/m ³

При дефинисању модела за прорачун одабран је солид базиран на одабраном материјалу. При томе се геометрија модела ослања на декартов правоугли координатни систем.

Као тип коначног елемента одабран је хексаедар без међучворова. Према препорукама је пожељно одабирати коначне елементе чије странице приближно заклапају угао од 90° због тачнијих резултата прорачуна. Укупна дужина цеви подељена је на 106 сегмената чија је приближна дужина 22 mm. По својој дебљини је зид цеви подељен на осам слојева док је цев по обиму подељена на 20 сегмената. Изглед цеви са генерисаном мрежом коначних елемената приказан је на слици 7.3.



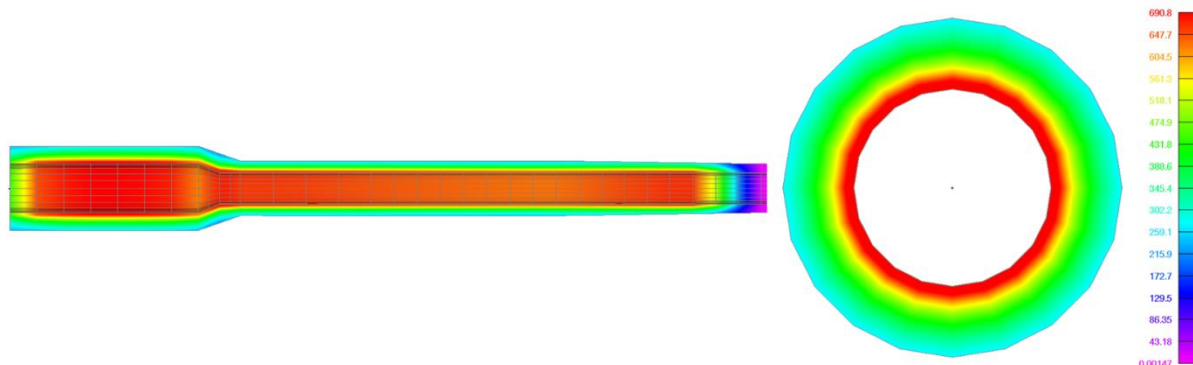
Слика 7.3 Мрежа коначних елемената цеви AT 30 mm

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

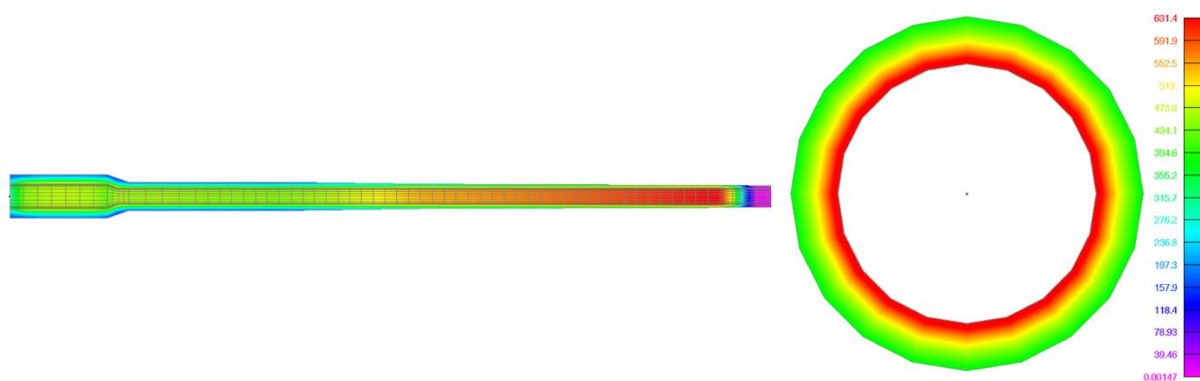
На цев аутоматског топа 30 mm делују притисак барутних гасова и сила земљине теже. Утицај силе земљине теже, која делује као запреминска сила, изражен је преко убрзања земљине теже од 9,81 m/s². Притисак барутних гасова делује на унутрашњи зид цеви (канал цеви) у подручју иза пројектила. Интензитет притиска барутних гасова варира дуж цеви. Већи је у подножју дна цеви него у подножју пројектила. Такође варира са протоком времена. Резултати УБ прорачуна двофазном методом су погодни за примену јер се у једном временском тренутку функција промене притиска задаје дуж канала цеви. Овакве функције су примењене на унутрашњи зид цеви у тренутку максималног притиска, на крају процеса сагоревања и у тренутку наилаaska пројектила на уста цеви. По дефинисању свих параметара потребних за прорачун врши се статичка анализа оптерећене цеви методом коначних елемената помоћу солвера NX NASTRAN, који је интегрални део софтвера FEMAP.

7.4.1. Анализа напонског стања цеви

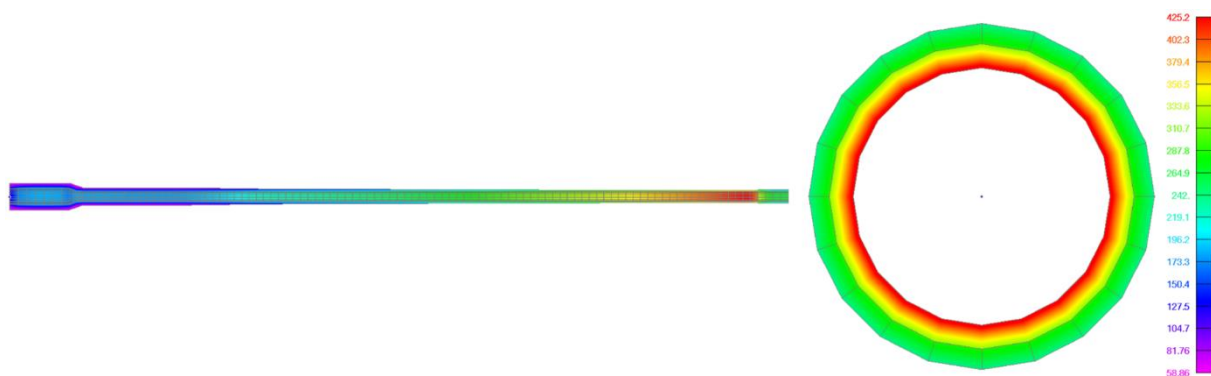
Након извршених прорачуна врши се учитавање резултата и приказују се жељени параметри. У овом случају то је напон у зиду цеви настао као последица деловања притиска барутних гасова на канал цеви. На сликама 7.4 до 7.6 приказани су резултати прорачуна на напрезање цеви ПА топа 30 *mm* за сва три карактеристична тренутка.



Слика 7.4 Напони у зиду цеви при максималном притиску барутних гасова



Слика 7.5 Напони у зиду цеви на крају сагоревања барута



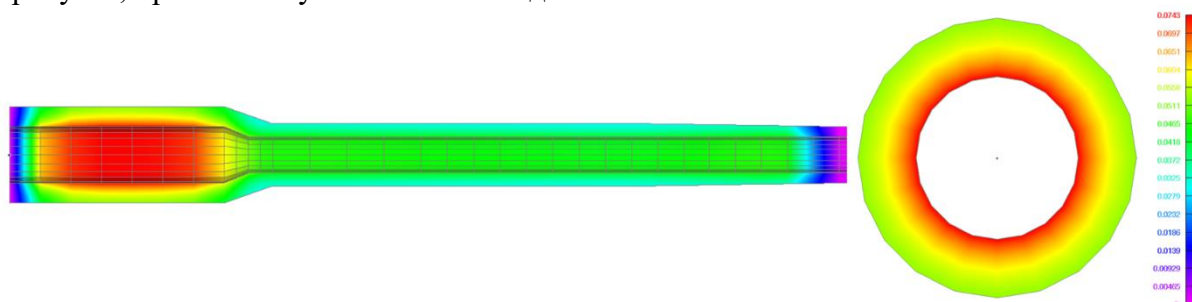
Слика 7.6 Напони у зиду цеви на крају процеса опаљења

Граница еластичности одабраног материјала износи $R_e = 785 \text{ MPa}$. Ова вредност не сме да се прекорачи у току процеса опаљења ни у једном сегменту дуж цеви. Са претходних слика се види да напон у цеви своју највишу вредност од 631,4 *MPa* достиже при крају процеса сагоревања барута. У том тренутку је најоптерећенији унутрашњи слој зида цеви непосредно до пројектила. Један од могућих разлога је смањивање дебљине зида цеви идући ка устима цеви. Овај напон је нижи од напона течења материјала што значи се цев противавионског топа 30 *mm* може безбедно користити при опаљењу.

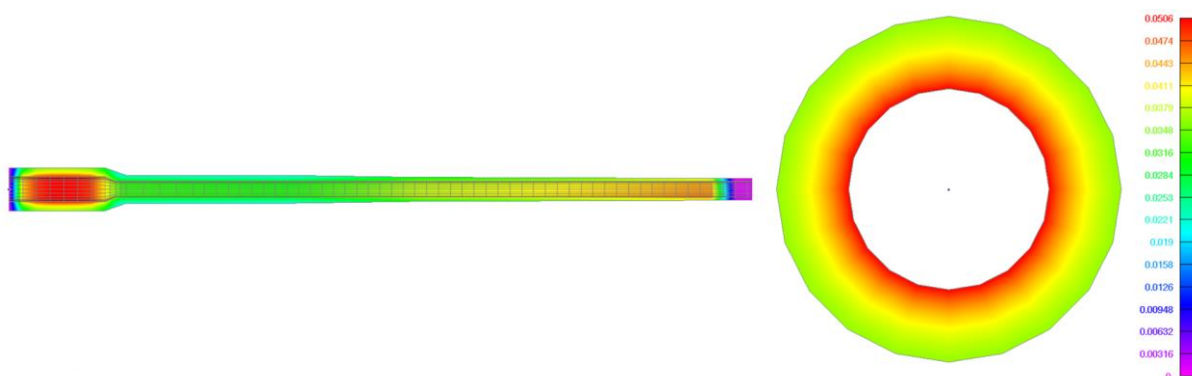
У тренутку достизања максималног притиска унутрашњи слој цеви је најоптерећенији у пределу барутне коморе, јер се ту јавља највиши притисак барутних гасова. За разлику од њега, на крају процеса опаљења се највиши напони јављају у пределу уста цеви због смањене дебљине зида цеви у тим сегментима.

7.4.2. Анализа деформација цеви

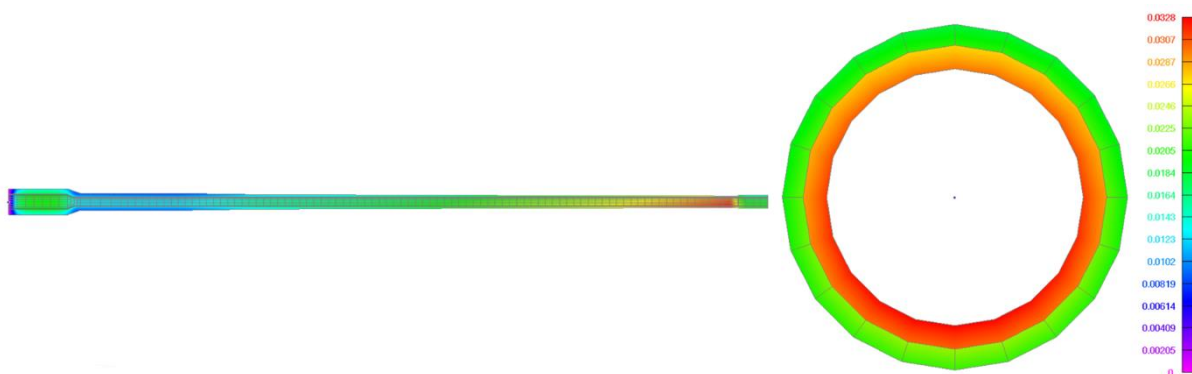
Како би се испитала померања цеви, односно деформације услед процеса опаљења, учитавају се резултати прорачуна методом коначних елемената. Деформације цеви играју јако битну улогу уколико је потребно измерити осцилације цеви. При томе је најутицајнија апсолутна деформација по радијалном правцу Δl_r , која је и учитана. Резултати прорачуна на деформације цеви ПА топа 30 mm, за сва три карактеристична тренутка, приказани су на сликама 7.7 до 7.9



Слика 7.7 Деформације зида цеви при максималном притиску барутних гасова



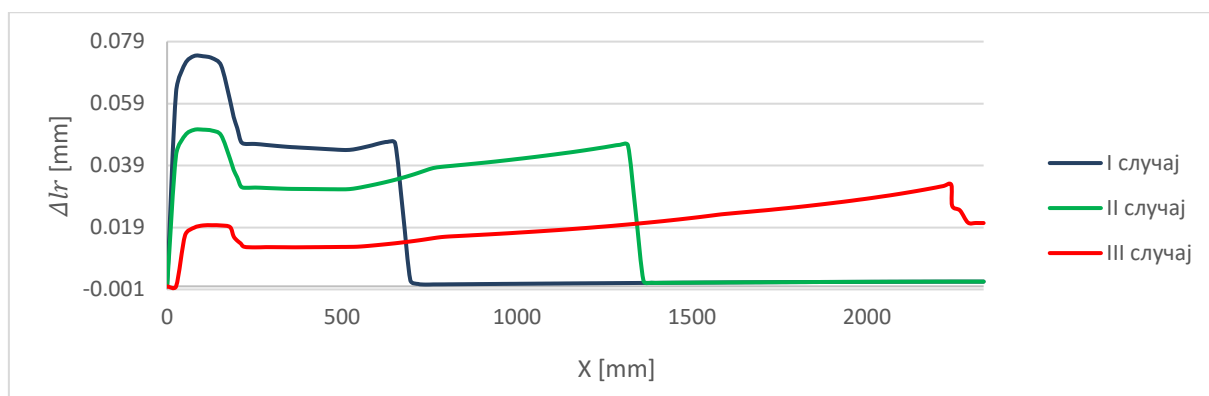
Слика 7.8 Деформације зида цеви на крају сагоревања барута



Слика 7.9 Деформације зида цеви на крају процеса опаљења

Битно је напоменути да су све деформације елатичног типа. Са претходних слика се може уочити да се највеће радијалне деформације цеви стварају у тренутку достизања максималног притиска барутних гасова и износе $0,0743 \text{ mm}$. Оне се јављају на унутрашњем слоју цеви у подручју барутне коморе где је и највећи притисак барутних гасова. Највеће деформације спољашњег слоја цеви су такође у тренутку достизања највећег притиска и износе приближно $0,05 \text{ mm}$. Интересантно је уочити да се на крају процеса опаљења у одређеној мери разликују вредности деформација по вартикалном правцу на устима цеви. Деформације су веће у доњој полутки цеви него у горњој. То је и очекивано с обзиром да је цев по овом моделу прорачуна укљештена на свом дну док је предњи крај (уста цеви) слободан. Под дејством сопствене тежине, односно силе земљине теже, уста цеви се савијају наниже.

Како би се међусобно упоредили деформације унутрашњег слоја цеви где су забележена највећа померања, селектована је група чворова дуж канала цеви. Њихова померања по радијалном правцу у свим карактеристичним тренуцима су приказана на слици 7.10.



Слика 7.10 Радијалне деформације унутрашњег канала цеви

Читајући претходни дијаграм уочава се да су све деформације ниже од $0,1 \text{ mm}$ што је сасвим прихватљиво. Када се посматра облик крива деформација, радијална померања су висока у пределу барутне коморе док након тога опадају на значајно нижу вредност која је константна у одређеној дужини. Нешто даље деформације расту у пределу непосредно иза пројектила. Испред пројектила су деформације минималне јер потичу само од дејства силе земљине теже. Највеће деформације су при највећем притиску б/г и локализоване су у подручју барутне коморе. Деформације унутрашњег слоја цеви су најниже на крају процеса опаљења јер је притисак б/г најнижег интензитета.

8. ЗАКЉУЧАК

У оквиру пројектовања цеви топа 30 *mm* извршени су бројни прорачуни, почев од табличних, аналитичких и нумеричких унутрашњемобалистичких прорачуна, преко димензионисања цеви па до њеног моделирања и испитивања на напоне и деформације. При томе су коришћена програмска решења састављена у програмском језику *FORTRAN*, коришћен је *EXCEL*, *SOLIDWORKS* и *FEMAP*.

За средство ПРАГА са интегрисаним аутоматским противавионским топом 30/2 *mm* М-53/59 дати су основни тактичко-технички подаци и у односу на ово средство су вршена нека поређења.

Табличном методом, односно методом Слухоцког, помоћу ГАУ таблица и одговарајућих израза је извршен УБ прорачун и пројектовање цеви. Тиме су добијене вредности дужине цеви од 2103 *mm*, највећег притиска барутних гасова од 328 *MPa*, масе барутног пуњења 0,212 *kg* и почетне брзине пројектила од 997 *m/s*.

Аналитичком методом, односно методом Дроздова, извршен је УБ прорачун на основу унапред дефинисаних полазних података. Вредности количине топлоте, масе пројектила, масе барутног пуњења и дужине цеви су вариране у опсегу $\pm 5\%$ у циљу проналажења оптималног решења. Под оптималним решењем се сматра оно за које почетна брзина пројектила има највишу вредност а притисак барутних гасова остаје у дозвољеним границама. Као оптимално решење одабрана је варијанта где је количина топлоте повећана за 5%. За ово решење су почетна брзина пројектила 1013 *m/s* а максимални притисак барутних гасова 3158 *MPa*. Маса барутног пуњења је 0,195 *kg* док је укупна дужина цеви 2482 *mm*.

Нумеричком методом двофазног струјања се извршио УБ прорачун за јако сличне почетне услове као и за аналитичку методу. Ова метода треба да створи што приближнију слику стварног процеса опаљења јер разматра промену притиска дуж канала цеви у једном временском тренутку. Након извршеног прорачуна добијена је вредност почетне брзине пројектила од 995 *m/s*, максималног притиска б/г (на дну цеви) од 274,6 *MPa*, укупне дужине цеви од 2483 *mm* и масе барутног пуњења од 0,195 *kg*. Притисак б/г све време у току процеса опаљења има вишу вредност на дну цеви него у делу цеви до пројектила. Брзина барутних гасова и барутних зрна је једнака нули у сегменту на дну цеви док је једнака брзини пројектила у сегменту цеви до пројектила.

При димензионисању цеви коришћен је критеријум енергије промене облика (Hubert-Mises-Henki) како би се израчунала еластична отпорност цеви. Коришћењем програма за димензионисање цеви, а на основу улазних података и криве притиска добијене двофазним УБ прорачуном, извршено је димензионисање цеви топа 30 *mm*. При прорачуну су примењени коефицијенти сигурности како би се оставила резерва у дебљини зида цеви за случај реалних одступања од математичког модела. Тиме је цев теоретски осигурана од пластичних деформација за те радне услове. Димензионисањем цеви добијена је спољна и унутрашња траса цеви. Сходно томе је извршено моделирање цеви у програму *SOLIDWORKS*.

Извршена је међусобна компаративна анализа табличне, аналитичке и нумеричке методе као и реалних вредности величина већ постојећег средства које се могу поредити. Дошло се до закључка да су брзине при аналитичкој и нумеричкој методи готово идентичне током целокупног процеса опаљења и да је средњи притисак дуж цеви током целокупног процеса нижи код нумеричке него код аналитичке методе.

Аналитичком методом се добија 1,3% већа брзина него она дефинисана код већ постојећег средства док је притисак 9,7% мањи. Уколико се говори о табличној методи притисак је 3,7% већи него код аналитичке методе док је почетна брзина пројектила 1,6% мања.

За цев измоделирану на основу димензионисања зида цеви, у програму *FEMAP* је дефинисан материјал и модел. Након што је направљена правилна мрежа хексаедарских коначних елемената дефинисани су гранични услови и оптерећења. Притисак б/г је постављен да оптерећује цев у тренутку максималног притиска б/г, у тренутку завршетка процеса сагоревања барута и на крају процеса опаљења, при наиласку пројектила на уста цеви. Тиме је уместо динамичког модела разматран статички процес у карактеристичним тренуцима. Прорачун методом коначних елемената је покренут преко солвера *NX NASTRAN*. Резултати прорачуна су очитани за напоне који се јављају у зиду цеви и за деформације. Ови напони су последица дејства оптерећења. Највиши напон који се читао је за време краја сагоревања барутних зрна и износи 631,4 МПа. С обзиром да граница еластичности за одабрани челик *SINOXX 4732* износи 785 МПа цев је остала у подручју еластичних деформација и безбедна је за коришћење. Највеће деформације се читавају у радијалном правцу и износе 0,0743 mm. Оне се јављају у тренутку достизања максималног притиска б/г и због свог малог интензитета деформације не утичу битно на одвијање процеса опаљења.

Уколико би се размотрио целокупан процес пројектовања цеви, најподобнијом се показао УБ прорачун методом Двофазног струјања, односно нумеричка метода. За јако сличну брзину пројектила као при аналитичкој методи, нумеричка метода остварује нижи притисак б/г. Такође пружа прегледну контролу над свим сегментима одвијања процеса опаљења тако да је могуће брзо и једноставно идентификовање недостатака модела и њихово отклањање. Ради коректности метода прорачуна, у току пројектовања се морају вредности притиска, брзина и деформација експериментално одредити, што спада у фазу израде и провере прототипског модела. Тек на основу реално измерених вредности се могу донети коначни закључци о прихватању математичког модела.

У погледу даљег развоја могуће је додатно смањити дебљину цеви на појединим местима која остају у подручју ниских напона током целокупног процеса опаљења, попут подручја прелазног конуса или дна цеви. Могуће је цев ојачати навлаком тако да се дебљина у подручју барутне коморе може смањити. Још један начин за уштеду на материјалу и смањењу масе је аутофретажа цеви. Тај производни процес подразумева излагање канала цеви притиску који превазилази границу еластичности, и задржавање на том притиску одређени временски период. По растерећењу цеви долази до стварања заосталих напона који делују ка оси цеви. При процесу опаљења притисак б/г прво савладава заостале напоне па тек онда врши еластичну деформацију. На тај начин се за исти ефекат примењује тања цев. Проблем који се јавља код аутофретаже је значајно поскупљење процеса производње због сложености процеса. Још једна могућност за даље унапређење процеса је моделирање већ постојеће цеви ПА топа 30/2 mm М-53/59 и њено тестирање на другачије услове опаљења методом коначних елемената и поређење са експерименталним резултатима.

СПИСАК КОРИШЋЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ

- [1] С. Арсић, *НАОРУЖАЊЕ КОПНЕНЕ ВОЈСКЕ*, ВОЈНОИЗДАВАЧКИ ЗАВОД, Београд, 2002.
- [2] <http://oklop2.tripod.com/praga/m53.htm>, 05.06.2020.
- [3] Д. Вујатовић, *ПРОТИВАВИОНСКИ ТОП 30/2 mm М-53/59*, Књига I (Опис, руковање и одржавање), Државни секретријат за народну одбрану, 1971.
- [4] Љ. Танчић, *УНУТРАШЊЕ БАЛИСТИЧКО ПРОЈЕКТОВАЊЕ*, МЕДИЈА ЦЕНТАР „ОДБРАНА“, Београд, 2014.
- [5] 30 mm Cartridge with HE-T Shell M69, FOR ANTI-AIRCRAFT GUN 30/2 mm M53, 53/59 (CS), Ammunition 020902
- [6] М. Цветковић, *Унутрашња балистика*, Сектор за ШОНИД, ГШ ВЈ, Београд, 1998.
- [7] Н. Христов, С. Савић, *Моделовање двофазног струјања у цеви оруђа са комбинованим пуњењем*, Војнотехнички гласник, Vol59, N. 4, 2011.
- [8] З. Ристић, *Механика артиљеријских оруђа*, Медија центар одбрана, Београд, 2018.
- [9] SINOXX 4732 Steel, SIJ Metal Ravne d.o.o., 2016.

ПРИЛОГ 1

ГАУ таблице за прорачун методом Слухоцког

 $\Delta = 650$

Δ_u \ p_m	320	360	400	440	480	520	560	600
1,0				1062	1100	1134	1162	1185
1,5		1192	1240	1278	1308	1333	1355	1373
2,0	1280	1339	1382	1414	1439	1460	1478	1493
2,5	1388	1440	1478	1506	1530	1550	1566	1579
3,0	1471	1519	1553	1578	1601	1619	1634	1646
3,5	1537	1581	1613	1637	1658	1675	1689	1701
4,0	1592	1632	1663	1686	1706	1722	1735	1747
4,5	1638	1676	1705	1727	1746	1761	1774	1786
5,0	1677	1712	1741	1762	1780	1795	1808	1819
5,5	1711	1745	1773	1793	1810	1825	1837	1848
6,0	1741	1775	1801	1821	1837	1852	1863	1874
6,5	1768	1801	1826	1846	1862	1876	1887	1897
7,0	1792	1824	1848	1868	1884	1898	1909	1918
7,5	1814	1845	1869	1888	1904	1917	1928	1937
8,0	1834	1864	1888	1907	1922	1934	1945	1954
9	1870	1899	1921	1939	1954	1966	1976	1986
10	1902	1929	1951	1968	1982	1994	2004	2014
11	1929	1956	1977	1994	2007	2019	2028	2038
12	1955	1980	2000	2017	2029	2041	2050	2059
13	1974	2001	2021	2037	2049	2060	2069	2078
14	1994	2020	2039	2055	2067	2077	2086	2095
15	2012	2037	2056	2071	2083	2093	2102	2110
16	2028	2052	2071	2086	2098	2108	2117	2124
17	2043	2067	2086	2100	2112	2122	2131	2138
19	2070	2094	2112	2125	2136	2146	2155	2162
20	2082	2105	2123	2136	2147	2157	2165	2172
Δ_k	1,723	1,348	1,104	0,937	0,818	0,727	0,653	0,592
V_k	1200	1135	1080	1033	992	959	924	895
B	1,634	1,457	1,318	1,206	1,114	1,037	0,969	0,910
Δ_u \ p_m	320	360	400	440	480	520	580	600

$\Delta = 700$

$\Lambda_u \backslash p_m$	320	360	400	440	480	520	560	600
1,0					1070	1105	1135	1160
1,5			1209	1252	1288	1318	1343	1364
2,0		1303	1355	1394	1425	1450	1471	1489
2,5	1345	1409	1457	1492	1520	1542	1561	1578
3,0	1434	1492	1535	1567	1592	1612	1630	1646
3,5	1505	1558	1597	1627	1650	1670	1687	1701
4,0	1562	1612	1649	1676	1699	1718	1734	1747
4,5	1610	1657	1692	1718	1740	1758	1773	1786
5,0	1651	1696	1729	1754	1775	1792	1806	1819
5,5	1686	1730	1762	1786	1806	1822	1836	1849
6,0	1717	1759	1790	1814	1833	1849	1863	1875
6,5	1745	1785	1815	1838	1857	1873	1887	1898
7,0	1770	1809	1838	1860	1879	1895	1908	1919
7,5	1793	1831	1859	1881	1899	1915	1928	1938
8,0	1814	1852	1880	1901	1918	1933	1946	1956
9	1850	1887	1914	1934	1951	1965	1977	1987
10	1882	1918	1943	1963	1979	1993	2005	2015
11	1910	1915	1969	1988	2004	2017	2029	2039
12	1935	1967	1992	2011	2026	2039	2051	2060
13	1957	1989	2013	2031	2046	2059	2070	2078
14	1977	2008	2032	2050	2064	2077	2087	2095
15	1995	2026	2049	2067	2081	2093	2103	2111
16	2012	2043	2065	2082	2096	2108	2118	2126
17	2028	2058	2080	2096	2110	2122	2132	2140
18	2043	2072	2093	2109	2123	2135	2145	2153
19	2056	2084	2105	2121	2135	2146	2156	2165
20	2068	2096	2117	2133	2146	2157	2166	2176
Λ_k	2,227	1,700	1,373	1,151	0,990	0,869	0,777	0,706
v_k	1289	1219	1161	1111	1068	1031	999	970
B	1,871	1,667	1,510	1,389	1,286	1,198	1,125	1,062
$\Lambda_u \backslash p_m$	320	360	400	440	480	520	560	600

ПРИЛОГ 2

Програмско решење УБ прорачуна методом Дроздова

```

PROGRAM DROZDOV
CHARACTER OR*16,BARUT*8
OPEN (60,FILE='ULAZ')
OPEN (61,FILE='IZLAZ')
READ(60,*) K1P,K2P
READ(60,*) W0,S,XU,FI,EM,OM,DELM
READ(60,*) ALFA,TETA,E0,AKAPA,ALAM,F,P0,U1
READ(60,*)OR,BARUT
WRITE(61,5) OR,BARUT
5 FORMAT(' ',///,18X,'UB-PRORACUN DROZDOVLJEVOM METODOM',/,
+' ',22X,'ORUDJE: ',A16,/,26X,'BARUT: ',A8,///)
WRITE(61,6)W0,S,XU,FI,EM,OM,F,DELM,ALFA,TETA,E0,
+AKAPA,ALAM,U1,P0
6 FORMAT(' ',20X,'JEDINICE PO SI SISTEMU MERA',///,
+26X,'POLAZNI PODACI',/,5X,'W0=',F11.9,1X,'S=',F8.6,
+5X,'XU=',F6.4,5X,'FI=',F6.4,12X,'M=',F7.5,/,5X,
+'OM=',F7.5,5X,'F=',F10.3,3X,'DELM=',F5.0,4X,
+'ALFA=',F11.9,5X,'TETA=',F5.3,/,5X,'E0=',F8.6,
+4X,'AKAPA=',F7.5,2X,'LAM=',F8.5,2X,'U1=',E16.10,
+2X,'P0=',E9.3)
C
C PRORACUN KONSTANTI I PRETHODNOG PERIODA
C
X=0
V=0
T=0
DELTA=OM/W0
PSI0=(1/DELTA-1/DELM)/(F/P0+ALFA-1/DELM)
SIG0=SQRT(1+4*ALAM/AKAPA*PSI0)
Y0=(SIG0-1)/(2*ALAM)
AK1=SIG0*AKAPA
AIK=E0/U1
VK=S/FI*AIK/EM
B=S**2*AIK**2/(F*OM*FI*EM)
B1=B*TETA/2-AKAPA*ALAM
GAMA=B1*PSI0/AK1**2
BM=SQRT(1+4*GAMA)
X0=W0/S
X1=X0*(1-ALFA*DELTA)
VL=SQRT(2/FI*F/EM*OM/TETA)
WRITE(61,7) DELTA,Y0,PSI0,SIG0
7 FORMAT(' ',19X,'GUSTINA PUNJENJA DELTA=',F4.0///25X,
+'PRETHODNI PERIOD'///11X,'Y0=',F7.5,5X,'PSI0=',
+F7.5,5X,'SIG0=',F7.5///)
WRITE(61,8)
8 FORMAT(' ',27X,'PRVI PERIOD'/' ',10X,'T',6X,
+'Y',8X,'PSI',6X,'V',9X,'X',6X,'P',9X,'T'/)
C

```

C PRVI PERIOD

C

H=(1-Y0)/K1P

VP=0

XP=0

TP=0

KP=0

DO 9 I=1,K1P

10 Y=Y0+H*I

XM=Y-Y0

11 PSI=PSI0+AK1*XM+AKAPA*ALAM*XM**2

PSISR=(PSI+PSI0)/2

XPSI=X0*(1-DELTA/DELM-DELTA*(ALFA-1/DELM)*PSI)

XPSIS=X0*(1-DELTA/DELM-DELTA*(ALFA-1/DELM)*PSISR)

BETA=B1/AK1*XM

ZED=(1-2*BETA/(BM+1))**((BM+1)/2/BM)*

+(1+2*BETA/(BM-1))**((BM-1)/2/BM)

X=XPSIS*(1/ZED**((B/B1)-1))

V=VK*XM

P=F/S*OM*(PSI-B*TETA/2*XM**2)/(XPSI+X)

IF(I-1) 12,12,13

12 T=3*X/V*(P0+P)/(2*P0+P)

GO TO 14

13 DELT=(1/VP+1/V)/2*(X-XP)

T=TP+DELT

14 IF(KP-1) 15,16,21

15 DPDT=P/(XPSI+X)*(F*OM/S*AKAPA/AIK*(1+2*ALAM*Y)*
+(1+(ALFA-1/DELM)*P/F)-(1+TETA)*V)

IF(DPDT) 17,19,21

16 IF(ABS(PM-P)-50) 19,19,18

17 KP=KP+1

18 PM=P

XM=AKAPA*SIG0/(B*(1+TETA)/(1+(ALFA-1/DELM)*PM/F)
+-2*AKAPA*ALAM)

Y=Y0+XM

GO TO 11

19 KP=KP+2

WRITE(61,20) Y,PSI,V,X,P,T

20 FORMAT(' ',9X,'PM',2F10.6,F8.2,F8.3,F12.0,F8.5)

GO TO 10

21 WRITE(61,22) I,Y,PSI,V,X,P,T

22 FORMAT(' ',8X,I3,2F10.6,F8.2,F8.3,F12.0,F8.5)

VP=V

TP=T

PP=P

YP=Y

PSIP=PSI

IF (X.GE.XU) GO TO 26

9 XP=X

IF (XP.GE.XU) GO TO 26

WRITE (61,23)

23 FORMAT(' ',///,27X,'DRUGI PERIOD',///,10X,'T',

```

+24X,'V',9X,'X',6X,'P',9X,'T')
C
C      DRUGI PERIOD
C
H=(XU-XP)/(K2P-K1P)
K2PP=K1P+1
X2P=XP
V2P=VP
P2P=P
IF(KP.EQ.0) PM=P
DO 24 I=K2PP,K2P
X=X2P+H*(I-K1P)
V=VL*SQRT(1-((X1+X2P)/(X1+X))**TETA*(1
+-V2P**2/VL**2))
P=P2P*((X1+X2P)/(X1+X))**(1+TETA)
DELT=(1/V+1/VP)/2*H
T=T+DELT
VP=V
WRITE(61,25) I,V,X,P,T
25 FORMAT (' ',8X,I3,20X,F8.2,F8.3,F12.0,F8.5)
24 CONTINUE
GO TO 28
26 DLX=(XU-XP)/(X-XP)
X=XU
V=VP+(V-VP)*DLX
P=PP+(P-PP)*DLX
T=TP+(T-TP)*DLX
PSI=PSIP+(PSI-PSIP)*DLX
Y=YP+(Y-YP)*DLX
WRITE(61,45)I,Y,PSI,V,X,P,T
45 FORMAT(' ',8X,I3,2F10.6,F8.2,F8.3,F12.0,
+F8.5/,12X,'NEPOTPUNO SAGOREVANJE')
28 CLOSE (60)
CLOSE (61)
STOP
END

```

ПРИЛОГ 3

Програмско решење УБ прорачуна методом двофазног струјања

```

C *****
C * RE[AVANJE LAGRAN@OVOG SISTEMA JEDNA^INA UNUTRA[NJE *
C * BALISTIKE SA NORMIRANIM PROMENLJIVIM U/1000 , UB/1000 *
C * I E/EB I ZA Q=ALFAG*(TEMP-TB0) *
C * *
C * POLAZNI PODACI : *
C * *
C * ROB - ZAPREMINSKA MASA BARUTA *
C * RB - PO^ETNA DEBLJINA BARUTNOG ZRNA *
C * AMZ0 - PO^ETNA MASA BARUTNOG ZRNA *
C * SZ0 - PO^ETNA POVR[INA BARUTNOG ZRNA *

```

```

C * ALFA - KOVOLUMEN BARUTNIH GASOVA *
C * AKAP - KOEFICIJENT OBLIKA "KAPA" *
C * ALAM - KOEFICIJENT OBLIKA "LAMDA" *
C * AMI - KOEFICIJENT OBLIKA "MI" *
C * CP - SPECIFI^NA TOPLOTA PRI KONSTANTNOM PRITISKU *
C * CV - SPECIFI^NA TOPLOTA PRI KONSTANTNOJ ZAPREMINI *
C * UZ0 - JEDINI^NA BRZINA SAGOREVANJA *
C * TB0 - PO^ETNA TEMPERATURA BARUTNOG ZRNA *
C * ALB - KOEFICIJENT PRELAZA TOPLOTE *
C * OM - PO^ETNA MASA BARUTA *
C * ETA - KEOFICIJENT DINAMI^KE VISKOZNOSTI *
C * EPS0 - POROZNOST NA PO^ETKU PRVOG PERIODA *
C * RO0 - GUSTINA BARUTNIH GASOVA NA PO^ETKU PRVOG PERIODA *
C * E0 - ENERGIJA BARUTNIH GASOVA NA PO^ETKU PRVOG PERIODA *
C * EB - ENERGIJA BARUTA *
C * P0 - PRITISAK FORSIRANJA *
C * X0 - PO^ETNI POLO@AJ PROJEKTILA *
C * XU - UKUPNA DU@INA UNUTRA[NJOSTI CEVI *
C * S - POPRE^NI PRESEK CEVI *
C * AM - MASA PROJEKTILA *
C * RB0 - PUT PLAMENA NA PO^ETKU PRVOG PERIODA *
C * T0 - VREME PRETHODNOG PERIODA *
C * N - BROJ TA^AKA PO PROMENLJIVOJ "S" *
C * ALFA0 - PO^ETNI KOEFICIJENT PROVO^ENJA TOPLOTE *
C * HTMAX - MAKSIMALAN KORAK PO VREMENU *
C * *
C * ZAVISNE PROMENLJIVE : *
C * *
C * X1(1,I) , X2(1,I) - NORMIRANA BRZINA BARUTNIH GASOVA *
C * X1(2,I) , X2(2,I) - NORMIRANA BRZINA BARUTNIH ZRNA *
C * X1(3,I) , X2(3,I) - POROZNOST *
C * X1(4,I) , X2(4,I) - GUSTINA BARUTNIH GASOVA *
C * X1(5,I) , X2(5,I) - NORMIRANA UNUTRA[NJA ENERGIJA *
C * X(I) - POLO@AJ U CEVI *
C * P(I) - PRITISAK BARUTNIH GASOVA *
C * X1... - NIVO "J" , X2... - NIVO "J+1" *
C * *
C * *
C * AUTOR : CVETKOVI] dr MILOJE *
C *****
C
C PROGRAM UBLAGR01
C DIMENSION X(50),X1(5,50),X2(5,50)
C CHARACTER ORUZJE*25
C COMMON /KOE1/R(50),P(50),Y(5,50),A(5,5,50),B(5,50)
C COMMON /KOE2/RB,AKAP,ALAM,AMI,AMZ0,SZ0,ROB,UZ0,EPS0,EB,
C 1CP,CV,ALFA,ETA,ALFA0,TB0,ALB
C OPEN(60,FILE='POD30PRAGA')
C OPEN(61,FILE='IZL30PRAGA')
C OPEN(62,FILE='GRAF30')
C
C POLAZNI PODACI:

```

```

C
C KONSTRUKTIVNI - VEZANI ZA CEV I MUNICIJU
C S,X0,XU,AM,OM,P0
C
C BALISTICKI - a) VEZANI ZA MODEL BARUTA A DOBIJAJU SE pp THP
C ALFA,CP,CV,UZ0,E0,EB,ROB
C
C - b) VEZANI ZA TIP BARUTA A DOBIJAJU SE pp POLPOD-om
C RB,AMZ0,SZ0,AKAP,ALAM,AMI
C
C OSTALI - uglavnom ne uti~u bitno na prora~un
C TB0,ALB,ETA,EPS0,RO0,RB0,T0,N,ALFA0
C
C READ(60,*) ROB,RB,AMZ0,SZ0,ALFA,AKAP,ALAM,AMI,CP,CV
C READ(60,*) UZ0,TB0,ALB,OM,ETA,EPS0,RO0,E0,EB,P0
C READ(60,*) X0,XU,S,AM,RB0,T0,N,ALFA0,HTMAX
C READ(60,*) ORUZJE
C
C *****
C * *
C * DEFINISANJE PO^ETNIH VREDNOSTI *
C * *
C *****
C
C TISP=0.00005
C DO 10 I=1,N
C R(I)=RB0
C P(I)=P0
C DO 20 J=1,5
C X1(J,I)=0
C X2(J,I)=0
C DO 20 K=1,5
C 20 A(K,J,I)=0
C X1(3,I)=EPS0
C X1(4,I)=RO0
C 10 X1(5,I)=E0/EB
C IP=0
C IW=-1
C PMAX=P0/1.E5
C IPMAX=1
C JPMAX=1
C JGRAF=0
C
C *****
C * *
C * ODRE\IVANJE KORAKA PO 'S' *
C * *
C *****
C
C T=0
C HS=OM/S/(N-1)

```

```

C
C *****
C *
C *   ODRE\IVANJE KORAKA PO 'T'   *
C *
C *****
C
C 5 AMAX=0
C   IP=IP+1
C   DO 30 I=1,5
C   DO 30 J=1,N
C 30 Y(I,J)=X1(I,J)
C   CALL KOEF(N,1)
C   DO 40 I=1,N
C   DO 40 L=1,5
C   SUMA=0
C   DO 50 K=1,5
C 50 SUMA=SUMA+A(K,L,I)
C   SUMA=ABS(SUMA)
C   IF(SUMA.GT.AMAX) AMAX=SUMA
C 40 CONTINUE
C   HT=HS/AMAX
C   IF(HT.GT.HTMAX) HT=HTMAX
C   HTS=HT/HS
C   PRINT *,N,HS,HT,AMAX
C   T=T+HT
C
C *****
C *
C *   RE[AVANJE SISTEMA JEDNA^INA   *
C *
C *****
C
C   DO 60 I=1,N
C   UZ=UZ0*P(I)
C 60 R(I)=R(I)+HT*UZ
C   DO 70 K=1,5
C   IF(K.LT.3) GO TO 1
C   KK=K-1
C   DO 80 I=1,KK
C   DO 80 J=1,N
C 80 Y(I,J)=X2(I,J)
C   CALL KOEF(N,K)
C 1 DO 70 I=1,N
C   IF(I.EQ.1) GO TO 2
C   IF(I.EQ.N) GO TO 3
C
C   RE[AVANJE SVIH TA^AKA OSIM RUBNIH
C
C   SUMA=0
C   DO 90 L=1,5
C 90 SUMA=SUMA+A(K,L,I)*(Y(L,I+1)-Y(L,I-1))

```

```

X2(K,I)=0.5*(X1(K,I+1)+X1(K,I-1))-0.5*HTS*SUMA+HT*B(K,I)
IF(.NOT.(K.EQ.3.AND.X2(K,I).GT.0.99)) GO TO 70
X2(3,I)=1
X2(2,I)=0
GO TO 70
C
C   ODREIVANJE VREDNOSTI NA DNU CEVI
C
2 IF(K.LT.3) GO TO 70
SUMA=0
DO 100 L=1,5
100 SUMA=SUMA+A(K,L,1)*(Y(L,2)-Y(L,1))
X2(K,1)=X1(K,1)-HTS*SUMA+HT*B(K,1)
IF(.NOT.(K.EQ.3.AND.X2(K,I).GT.0.99)) GO TO 70
X2(3,I)=1
GO TO 70
C
C   ODREIVANJE VREDNOSTI NA DNU PROJEKTILA
C
3 IF(K.GT.2) GO TO 4
X2(K,N)=X1(K,N)+P(N)*S/AM*HT/1000
GO TO 70
4 SUMA=0
DO 110 L=1,5
110 SUMA=SUMA+A(K,L,N)*(Y(L,N)-Y(L,N-1))
X2(K,N)=X1(K,N)-HTS*SUMA+HT*B(K,N)
IF(.NOT.(K.EQ.3.AND.X2(K,I).GT.0.99)) GO TO 70
X2(3,I)=1
X2(2,I)=0
70 CONTINUE
C
C   PRORA^UN PUTA PROJEKTILA I PRITISKA GASOVA
C
X(1)=0
DO 120 I=1,N
P(I)=EB*X2(5,I)*X2(4,I)*(CP/CV-1)/(1-ALFA*X2(4,I))
PRIT=P(I)/1.E5
IF(PMAX.GT.PRIT) GO TO 6
PMAX=PRIT
IPMAX=IP
JPMAX=I
6 IF(I.EQ.1) GO TO 120
X(I)=X(I-1)+HS/(X2(4,I)*X2(3,I)+ROB*(1-X2(3,I)))
120 CONTINUE
C
C   *****
C   *                                     *
C   *   ISPIS REZULTATA ZA JEDAN VREMENSKI KORAK   *
C   *                                     *
C   *****
C
PRINT *,IP

```

```

C   IF(IP/8*8.NE.IP) GO TO 65
    IF(T.LT.TISP) GO TO 65
    TISP=TISP+0.00005
    T1=1000*T
    EN=EB*X2(5,1)/1.E6
    PUT=100*X(1)
    PRIT=P(1)/1.E5
    UBG=1000*X2(1,1)
    UBZ=1000*X2(2,1)
    IW=IW+1
    IF(IW/3*3.NE.IW) GO TO 62
    WRITE(61,61) ORUZJE
61  FORMAT('1//26X,'UNUTRA[NJE BALISTI^KI PRORA^UN'/
      1 28X,'LAGRAN@OV SISTEM JEDNA^INA'/29X,A25//
      2 4X,'VREME  PUT  POROZ.  GUSTINA  U-GAS',
      3 '    U-BZ  ENERGIJA  PRITISAK'/6X,'MS',7X,'CM',13X,
      4 'KG/M**3'5X,'M/S',8X,'M/S',5X,'MJ/KG',7X,'BAR'/)
62  WRITE(61,63) T1,PUT,X2(3,1),X2(4,1),UBG,UBZ,EN,PRIT
63  FORMAT(/4X,F5.3,F8.2,F10.5,F9.2,2F10.3,F11.6,F11.2)
    JGRAF=JGRAF+1
    WRITE(62,*) T1,PUT,X2(4,1),UBG,UBZ,EN,PRIT
    DO 130 I=2,N
    EN=EB*X2(5,I)/1.E6
    PUT=100*X(I)
    PRIT=P(I)/1.E5
    UBG=1000*X2(1,I)
    UBZ=1000*X2(2,I)
    WRITE(62,*) T1,PUT,X2(4,I),UBG,UBZ,EN,PRIT
130  WRITE(61,64) PUT,X2(3,I),X2(4,I),UBG,UBZ,EN,PRIT
64  FORMAT(9X,F8.2,F10.5,F9.2,2F10.3,F11.6,F11.2)

C
C   *****
C   *                               *
C   *   USLOV ZA KRAJ PRORA^UNA   *
C   *                               *
C   *****
C
65  DO 140 K=1,5
    DO 140 I=1,N
140  X1(K,I)=X2(K,I)
    IF(X(N).LT.XU) GO TO 5

C
C
C   *****
C   *                               *
C   *   ISPIS POSLEDNJE TA^KE     *
C   *                               *
C   *****
C
    T1=1000*T
    EN=EB*X2(5,1)/1.E6
    PUT=100*X(1)

```

```

PRIT=P(1)/1.E5
UBG=1000*X2(1,1)
UBZ=1000*X2(2,1)
IW=IW+1
IF(IW/3*3.NE.IW) GO TO 66
WRITE(61,61) ORUZJE
66 WRITE(61,63) T1,PUT,X2(3,1),X2(4,1),UBG,UBZ,EN,PRIT
JGRAF=JGRAF+1
WRITE(62,*) T1,PUT,X2(4,1),UBG,UBZ,EN,PRIT
DO 150 I=2,N
EN=EB*X2(5,I)/1.E6
PUT=100*X(I)
PRIT=P(I)/1.E5
UBG=1000*X2(1,I)
UBZ=1000*X2(2,I)
WRITE(62,*) T1,PUT,X2(4,I),UBG,UBZ,EN,PRIT
150 WRITE(61,64) PUT,X2(3,I),X2(4,I),UBG,UBZ,EN,PRIT
C
C  ISPIS MAKSIMALNOG PRITISKA
C
  WRITE(61,67) PMAX,IPMAX,JPMAX
67 FORMAT(///' Maksimalan pritisak:',F6.0,' bara/'
1 ' Redni broj koraka:',I8/' Redni broj ta~ke:',I9)
C
C  ISPIS PODATAKA ZA GRAFIK
C
  WRITE(61,68) N,JGRAF
68 FORMAT(//' Broj tacaka po polo`aju u cevi : ',I2/
1 ' Broj ta~aka po vremenu :',I2)
CLOSE(60)
CLOSE(61)
CLOSE(62)
STOP
END
C
C *****
C *
C * PRORA^UN KOEFICIJENATA U JEDNA^INAMA *
C *
C *****
C
SUBROUTINE KOEF(N,K)
COMMON /KOE1/R(50),P(50),Y(5,50),A(5,5,50),B(5,50)
COMMON /KOE2/R0,AK,AL,AM,AMZ0,SZ0,ROB,UZ0,EPS0,EB,
1 CP,CV,ALFA,ETA,ALFA0,TB0,ALB
EPS1=1/(1+0.02*(1-EPS0)/EPS0)
DO 10 I=1,N
U=Y(1,I)
UB=Y(2,I)
EPS=Y(3,I)
RO=Y(4,I)
E=Y(5,I)

```

```

RS=R(I)
PM=P(I)
YM=RS/R0
PSI=AK*YM*(1+AL*YM+AM*YM**2)
AMZ=AMZ0*(1-PSI)
SIG=1+2*AL*YM+3*AM*YM**2
SZ=SIG*SZ0
UZ=UZ0*PM
BM=(1-EPS)*ROB*UZ*SZ/AMZ
A1=1000*ROB*(1-EPS)*(U-UB)
A2=RO*EPS+ROB*(1-EPS)
F=0
Q=0
F1=(1000*BM*ROB*(UB-U)-F)/RO/EPS
IF(EPS.GT.0.99) GO TO 2
FZ=1.75*((1-EPS)/(1-EPS0)*EPS0/EPS)**0.45
IF(EPS.GT.EPS1) FZ=0.3
RZ=R0-RS
IF(RZ.LT.1.E-7) GO TO 2
F=1.E6*FZ*(1-EPS)/2/RZ*ABS(U-UB)*(U-UB)*RO
F1=(1000*BM*ROB*(UB-U)-F)/RO/EPS
AT=ALB/RO/CP
RE=2000*RO*ABS(U-UB)*RZ/ETA
ALFAG=0.2*ALB/RZ*RE**0.67*(ETA*CP/ALB)**0.33
IF(ALFAG.LT.1.) ALFAG=ALFA0
TEMP=E*EB/CV
Q=ALFAG*(TEMP-TB0)
2 F2=BM*ROB*(EB+PM/ROB+1.E6*UB**2/2)-1000*F*UB-BM*Q/UZ
F3=(F2-1000*F1*RO*EPS*U-BM*ROB*(EB*E+1.E6*U**2/2))/EPS/RO
A3=PM*(1000*(U-UB)+A1/EPS/RO)
A4=A2*PM/RO*(1-EPS)/EPS
IF(K.GT.2) GO TO 3
A(1,1,I)=A1
A(1,4,I)=A2*E/1000*EB/RO*(CP/CV-1)/(1-ALFA*RO)**2
A(1,5,I)=A2*EB/1000*(CP/CV-1)/(1-ALFA*RO)
B(1,I)=F1/1000
DO 20 L=1,5
20 A(2,L,I)=0
B(2,I)=0
IF(EPS.GT.0.99) GO TO 3
A(2,2,I)=-A1*RO/ROB*EPS/(1-EPS)
A(2,4,I)=A2*E/1000*EB/ROB*(CP/CV-1)/(1-ALFA*RO)**2
A(2,5,I)=A2*EB/1000*RO/ROB*(CP/CV-1)/(1-ALFA*RO)
B(2,I)=F/ROB/(1-EPS)/1000
3 IF(K.GT.3) GO TO 4
DO 30 L=1,5
30 A(3,L,I)=0
B(3,I)=0
IF(EPS.GT.0.99) GO TO 4
A(3,2,I)=-1000*A2*(1-EPS)
A(3,3,I)=-1000*RO*EPS*(U-UB)
B(3,I)=BM

```

```

4 IF(K.GT.4) GO TO 5
  A(4,1,I)=1000*A2*RO
  A(4,2,I)=1000*A2*RO*(1-EPS)/EPS
  A(4,3,I)=1000*A2*RO/EPS*(U-UB)
  IF(EPS.GT.0.99) A(4,3,I)=0
  A(4,4,I)=A1
  B(4,I)=BM/EPS*(ROB-RO)
5 A(5,1,I)=1000*PM*A2/RO/EB
  A(5,2,I)=1000*A4/EB
  A(5,3,I)=A3/EB
  A(5,5,I)=A1
  IF(EPS.LT.0.99) GO TO 10
  A(5,2,I)=0
  A(5,3,I)=0
10 B(5,I)=(F3-PM*BM/EPS/RO)/EB
  RETURN
  END

```

ПРИЛОГ 4

Програмско решење за димензионисање цеви

```

PROGRAM KODCEV
INTEGER BR1,BR2,BR,KA,W,METO,AUT
REAL LU
DIMENSION X(100),Y(100),P(100),PRI(100),R(100),T(100),YP(100)
DIMENSION DET(100)
OPEN (1,FILE='ULUB155')
OPEN (2,FILE='UBPX155')
OPEN (3,FILE='POM')
OPEN (4,FILE='POS')
OPEN (5,FILE='IDACE')
OPEN (6,FILE='IDACEV')
REWIND 1
READ (1,*)W0,SK,S,DK,D,OM,EM,SIGE,AUT,METO
DO 10 L=1,37
10 READ (2,*)Y(L),X(L),P(L)
  BR1=0.
  BR2=0.
  BR=0.
  PM=0.
  PK=0.
  PU=0.
  XM=0.
  XK=0.
  XU=0.
C  ****ODREDJIVANJE KARAKTERISTICNIH TACAKA IZ UB PRORACUNA***
DO 20 I=1,37
  IF(P(I).GE.PM)THEN
    PM=P(I)
    XM=X(I)
    BR=I

```

```

ELSE
PU=P(I)
XU=X(I)
BR2=I
ENDIF
      IF(BR1.GT.0) GOTO 20
IF(Y(I).EQ.1.)THEN
PK=P(I)
XK=X(I)
BR1=I
      ENDIF
20 CONTINUE
IF(METO.EQ.0) THEN
WRITE(5,5)
5  FORMAT(1H,10X,"PRAKTICNO DIMENZIONISANA CEV")
ELSE IF(METO.EQ.1) THEN
WRITE(5,7)
7  FORMAT(1H,10X,"DIMENZ. CEVI PO I TEORIJI CVRSTOCE")
ELSE IF(METO.EQ.2) THEN
WRITE(5,9)
9  FORMAT(1H,10X,"DIMENZ. CEVI PO II TEORIJI CVRSTOCE")
ELSE IF(METO.EQ.3) THEN
WRITE(5,11)
11 FORMAT(1H,10X,"DIMENZ. CEVI PO III TEORIJI CVRSTOCE")
ELSE IF(METO.EQ.4) THEN
WRITE(5,13)
13 FORMAT(1H,10X,"DIMENZ. CEVI PO IV TEORIJI CVRSTOCE")
ENDIF
WRITE(5,15)XM,XK,XU
WRITE(5,17)PM,PK,PU
15 FORMAT(1H,10X,"XM=",F8.6,6X,"XK=",F8.6,6X,"XU=",F8.6)
17 FORMAT(1H,10X,"PM=",F11.0,3X,"PK=",F11.0,3X,"PU=",F10.0)
C  ***RACUNANJE PC NA OSNOOVU PM*****
IF(D.LT.DK) GO TO 25
X0=W0/S
IF(METO.EQ.0) GO TO 27
PC=PM*(1+0.5*OM/EM)
GO TO 35
27 PC=1.35*PM*(1+0.5*OM/EM)
GO TO 35
25 X0=W0/SK
IF(METO.EQ.0) GO TO 29
PC=PM*(1+0.55*OM/EM)*(D/DK)**0.6
GO TO 35
29 PC=1.35*PM*(1+0.55*OM/EM)*(D/DK)**0.6
35 X0XM=X0+XM
X0XK=X0+XK
LU=XU+X0
WRITE(5,31) LU
31 FORMAT(1H,27X,"LU=",F8.6)
C  ***LINEARNA INTERPOLACIJA OD PC DO PM***
H=X0XM/20

```

```

X(1)=0.
PRI(1)=PC
WRITE(3,*)X(1),PRI(1)
DO 30 J=1,20
X(J)=H*J
X(J+1)=X(J)
IF(METO.EQ.0 ) GO TO 33
P(J)=PC+(PM-PC)*X(J)/X0XM
GO TO 75
33 P(J)=PC+(1.35*PM-PC)*X(J)/X0XM
75 PRI(J+1)=P(J)
WRITE(3,*)X(J+1),PRI(J+1)
30 CONTINUE
C ***ELIMINACIJA KRIVULJE IZ UBP OD 0 DO XM***
REWIND 2
KA=0
DO 40 K=1,37
READ(2,*)Y(K),X(K),P(K)
IF(X(K).GT.XM) GO TO 37
KA=KA+1
GO TO 40
37 X(K)=X0+X(K)
X(21+K-KA)=X(K)
IF(METO.GT.0) GO TO 39
YP(K)=1.20+0.70*(X0+X(K)-X0XM)/(LU-X0XM)
P(K)=P(K)*YP(K)
39 PRI(21+K-KA)=P(K)
45 WRITE(3,*)X(K),P(K)
40 CONTINUE
C ***RACUNANJE KONSTR. KRIVULJE ZA X0+XM,XM DO XK I XK DO XU***
C *** I POMERANJE KONSTR.KRIVULJE OD X0XM ZA 3*D***
IF(METO.EQ.0) GO TO 47
REWIND 3
W=20+K-KA
DO 50 M=1,W
READ(3,*)X(M),P(M)
IF((X(M).GE.0.).AND.(X(M).LT.X0XM))THEN
PRI(M)=P(M)*1.15*1.06
WRITE(4,*)X(M),PRI(M)
ELSE IF((X(M).GE.X0XM).AND.(X(M).LT.X0XK)) THEN
PRI(M)=P(M)*(1.15-0.1*(X(M)-X0XM)/(X0XK-X0XM))*1.06
X(M)=X(M)+3*D
WRITE(4,*)X(M),PRI(M)
ELSE IF(X(M).GE.X0XK)THEN
PRI(M)=P(M)*1.05*1.06
X(M)=X(M)+3*D
WRITE(4,*)X(M),PRI(M)
ENDIF
50 CONTINUE
47 WRITE(5,18)
18 FORMAT(1H,13X,"M",6X,"X(M)",5X,"PRI(M)",9X,"R2",7X,"R1")
C ***DIMENZIONISANJE CEVI-RACUNANJE R2 NA OSNOVU PK. I SIGMAE***

```

```

IF(METO.EQ.0) THEN
W=20+K-KA
REWIND 3
ELSE IF(METO.GT.0) THEN
REWIND 4
ENDIF
DO 60 N=1,W
IF(METO.EQ.0) THEN
READ(3,*) X(N),PRI(N)
ELSE IF(METO.GT.0) THEN
READ(4,*) X(N),P(N)
ENDIF
IF(METO.GT.0) GO TO 49
IF(D.LT.DK) GO TO 69
R(N)=D/2
GO TO 53
69 IF(X(N).LE.X0) GO TO 51
R(N)=D/2
GO TO 53
51 R(N)=DK/2
53 T(N)=SQRT((SIGE*R(N)**2)/(SIGE/2-PRI(N)))
GO TO 55
49 IF(D.LT.DK) GO TO 71
R(N)=D/2
GO TO 59
71 IF(X(N).LE.X0) GO TO 57
R(N)=D/2
GO TO 59
57 R(N)=DK/2
59 IF(X(N).LE.LU/2) GO TO 61
GO TO 63
61 IF(METO.EQ.1) THEN
T(N)=SQRT(R(N)**2*(SIGE+1.55*PRI(N))/(SIGE-1.55*PRI(N)))
ELSE IF(METO.EQ.2) THEN
T(N)=SQRT(R(N)**2*(3*SIGE+2*PRI(N))/(3*SIGE-4*PRI(N)))
ELSE IF(METO.EQ.3) THEN
T(N)=SQRT((SIGE*R(N)**2)/(SIGE/2-PRI(N)))
ELSE IF(METO.EQ.4) THEN
DET(N)=2*R(N)**2*PRI(N)*SIGE*SQRT(4-(3*PRI(N)**2)/SIGE**2)
T(N)=SQRT((2*SIGE**2*R(N)**2+DET(N))/(2*(SIGE**2-3*PRI(N)**2)))
ENDIF
63 IF((X(N).GT.(LU/2)).AND.(X(N).LT.(2*LU/3))) THEN
PRI(N)=PRI(N)*1.1
R(N)=D/2
IF(METO.EQ.1) THEN
T(N)=SQRT(R(N)**2*(SIGE+1.55*PRI(N))/(SIGE-1.55*PRI(N)))
ELSE IF(METO.EQ.2) THEN
T(N)=SQRT(R(N)**2*(3*SIGE+2*PRI(N))/(3*SIGE-4*PRI(N)))
ELSE IF(METO.EQ.3) THEN
T(N)=SQRT((SIGE*R(N)**2)/(SIGE/2-PRI(N)))
ELSE IF(METO.EQ.4) THEN
DET(N)=2*R(N)**2*PRI(N)*SIGE*SQRT(4-(3*PRI(N)**2)/SIGE**2)

```

```

T(N)=SQRT((2*SIGE**2*R(N)**2+DET(N))/(2*(SIGE**2-3*PRI(N)**2)))
ENDIF
ELSE IF(X(N).GE.(2*LU/3))THEN
PRI(N)=PRI(N)*1.25+5000E+04
R(N)=D/2
IF(METO.EQ.1)THEN
T(N)=SQRT(R(N)**2*(SIGE+1.55*PRI(N))/(SIGE-1.55*PRI(N)))
ELSE IF(METO.EQ.2)THEN
T(N)=SQRT(R(N)**2*(3*SIGE+2*PRI(N))/(3*SIGE-4*PRI(N)))
ELSE IF(METO.EQ.3)THEN
T(N)=SQRT((SIGE*R(N)**2)/(SIGE/2-PRI(N)))
ELSE IF(METO.EQ.4)THEN
DET(N)=2*R(N)**2*PRI(N)*SIGE*SQRT(4-(3*PRI(N)**2)/SIGE**2)
T(N)=SQRT((2*SIGE**2*R(N)**2+DET(N))/(2*(SIGE**2-3*PRI(N)**2)))
ENDIF
ENDIF
C   ***RESENJE OJACANJA CEVI AKO JE POTREBNO***
IF(AUT.EQ.1) GO TO 55
IF((P(N).GT.3E+8).AND.(P(N).LE.5E+8)) THEN
PRI(N)=PRI(N)*1.05
ELSE IF(P(N).GT.5E+8) THEN
PRI(N)=PRI(N)*1.1
ENDIF
55  WRITE(6,65)N,X(N),PRI(N),T(N),R(N)
    WRITE(5,67)N,X(N),PRI(N),T(N),R(N)
65  FORMAT(1H ,10X,I4,F10.5,F13.0,2F10.5)
67  FORMAT(1H ,10X,I4,F10.5,F13.0,2F10.5)
60  CONTINUE
    CLOSE (1)
    CLOSE (2)
    CLOSE (3)
    CLOSE (4)
    CLOSE (5)
    CLOSE (6)
    STOP
    END

```