

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Војна академија Универзитета одбране у Београду



Назив студијског програма: Војноиндустријско инжењерство

Ниво студија: Основне академске студије

Модул: Наоружање

Предмет: Конструкција аутоматског наоружања

Број индекса: 524/2011

Невена М. Стевановић

Експериментална анализа загревања цеви аутоматског оружја

Дипломски рад

Комисија за преглед и одбрану:

- 1. ред. проф. др Богдан Недић - председник**
- 2. др Дамир Јерковић - члан**
- 3. доц. др Александар Кари - ментор**

Датум одбране: _____

Оцена: _____

Крагујевац, септембар 2015.

У оквиру овог дипломског рада кандидат треба да обради следеће:

1. Проблем загревања цеви аутоматског оружја,
2. Математички модел нестационарног провођења топлоте кроз цев,
3. Симулациони модел нестационарног провођења топлоте кроз цев,
4. Експериментално испитивање загревања цеви аутоматског оружја,
5. Закључак о загревању цеви и експериментално добијеним резултатима.

Препоручена литература:

Љ. Танчић, *Унутрашње балистичко пројектовање*, уџбеник, ВА, Београд, 2010.

Mishra A., Hameed A., & Lawton B., *A Novel scheme for computing gun barrel temperature history and its experimental validation*, Journal of Pressure Vessel Technology: Transactions of ASME, Volume 132, 2010.

П. Радовић, *Неки аспекти процеса загревања цеви аутоматског оружја у току гађања*, ВТИ Београд, 1984.

Крагујевац, септембар 2015.

ментор:

др Александар Кари, дипл. инж.

Резиме:

Током опаљења, ствара се велика количина топлоте која углавном потиче од загрејаних барутних гасова насталих сагоревањем барута и топлота се преноси конвекцијом и зрачењем на цев оружја. На тај начин цев у врло кратком временском интервалу може достићи веома високе температуре. Рад описује последице које настају услед загревања цеви оружја и могуће начине хлађења цеви. Такође је приказано експериментално испитивање загревања цеви. У прилогу је дато програмско решење у Fortranу за симулацију температурног напрезања цеви при јединачној паљби.

Кључне речи: цев, пренос топлоте, температура

Summary:

When firing from small arms a great amount of heat is produced which heated powder gases, which combustion ignited by a shower of incandescent particles, mainly generate and the heat is transferred to the barrel by convection and by radiation. The barrel thus may reach very high temperature in a very short time span. This paper describes the consequences that occur when the barrel of arms is heated and the possible ways of barrel of arms cooling. The experimental testing of the barrel heating is presented in the paper as well. The programmatic result to simulation of the thermal stress of the barrel during a single shot is enclosed here in the programming language Fortran.

Keywords: barrel, heat transfer, temperature

Садржај:

УВОД.....	4
1. ПРОБЛЕМ ЗАГРЕВАЊА ЦЕВИ АУТОМАТСКОГ ОРУЖЈА	5
2. НАЧИНИ СМАЊЕЊА ЗАГРЕВАЊА ЦЕВИ	9
3. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ НЕСТАЦИОНАРНОГ ПРОВОЂЕЊА ТОПЛОТЕ КРОЗ ЦЕВ	14
3.1. Примена методе коначних разлика на математички модел нестационарног провођења топлоте кроз цев	15
3.2. Нумерички алгоритам за програмско решење.....	17
3.3. Програмско решење	20
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ЗАГРЕВАЊА СПОЉНЕ ТРАСЕ ЦЕВИ.....	22
5. ЗАКЉУЧАК.....	28
ЛИТЕРАТУРА.....	29
Прилози	30

УВОД

Цев стрелачког оружја је свакако најважнији склоп оружја у којем непосредно долази до сагоревања барутног пуњења и активним дејством барутних гасова зрну се задаје почетна брзина у жељеном правцу. У цеви се одвијају динамички процеси претварања потенцијалне хемијске енергије барута у кинетичку и топлотну енергију у веома кратком временском интервалу. Зато цев захтева посебну пажњу при пројектовању и производњи [1].

Основни захтеви који се постављају пред цев стрелачког оружја су следећи:

- довољна еластична отпорност цеви која треба да обезбеди да не дође до пластичних деформација цеви услед дејства високог притиска барутних гасова,
- велика жилавост или неосетљивост на механичко дејство водећих делова зрна (кошуљице или водећег прстена), несагорелих барутних зрна и барутних гасова који имају висок притисак и температуру,
- обезбеђивање задате почетне брзине и стабилности лета зрна,
- непостојање заосталих деформација услед дејства случајних сила при употреби оружја и значајних осцилација при гађању,
- минимално могуће загревање цеви при опаљењу чиме се обезбеђује већи интензитет ватре и продужава животни век цеви.

Последњи наведени захтев је и тема овог рада.

Канал цеви, од којег зависе захтеване балистичке карактеристике цеви, у току опаљења подвргнут је различитим напрезањима која доводе до хабања цеви и оштећења цеви. Цев је у току опаљења истовремено изложена троструким напрезањима:

- механичким (трење зрна о поља и жљебове и удари несагорелих барутних честица),
- термичким,
- хемијским.

Механичка напрезања доводе до оштећења поља и жљебова и стварања деформација у унутрашњости цеви. При сагоревању барута у току опаљења у цеви се ствара висок притисак и температура који изазивају ширење канала цеви. Скокови температуре могу изазвати топљење унутрашњег слоја цеви, а микрупукотине прерастају у мрежасту структуру. Соли, које се јављају као продукти сагоревања, уз влагу из ваздуха образују раствор који је изузетно корозиван [1].

Материјал од којег се израђује цев мора да испуњава следеће услове:

- висока граница еластичности, јер што је виша граница еластичности, мања је маса цеви,
- велика жилавост, односно цеви на хабање услед урезивања и кретања зрна кроз цев,
- отпорност на хемијска и температурна оптерећења,
- да буде јефтин и доступан у нашој земљи.

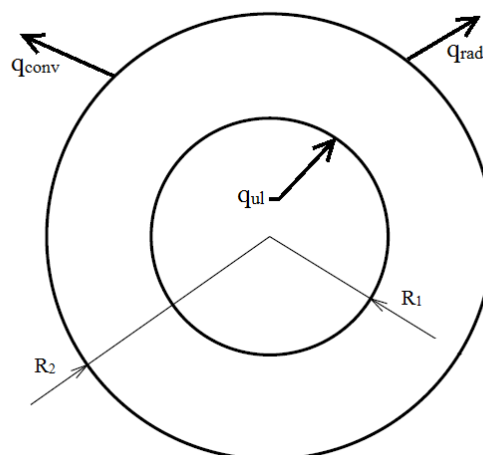
У раду је описан процес загревања цеви, последице које се јављају услед загревања цеви оружја, као и предности и недостаци коришћених решења за смањење загревања цеви. У раду је дат и математички модел нестационарног провођења топлоте кроз цев и приказ експерименталних резултата мерења загревања цеви.

1. ПРОБЛЕМ ЗАГРЕВАЊА ЦЕВИ АУТОМАТСКОГ ОРУЖЈА

Оруђа-оружја представљају најоптерећеније до сада реализоване топлотне уређаје на основу услова експлоатације и режима рада. Она морају ефикасно и поуздано да функционишу у температурном подручју околине од -40 до $+50^{\circ}\text{C}$, у условима високе влажности, као и условима експлоатације када су изложени великом запрању (блато, вода, песак и др.). Оружје, нарочито аутоматско, ради у екстремним режимима рада, при којима притисци достижу вредност $300\text{--}400\text{ МПа}$, а температуре појединих делова (унутрашња површина цеви) достижу и 1000°C , а све то у јако кратким временским интервалима. Тенденције развоја наоружања подразумевају непрекидно повећање ватрене моћи оруђа-оружја које прати пораст почетне брзине пројектила, максималног притиска барутних гасова, масе пуњења и брзине гађања. Све то доводи до интензивног загревања зидова цеви у процесу опаљења. Противуречност захтева за што отпорнијом конструкцијом, у условима компликованих вишеосних механичких и термичких, јако променљивих, цикличних и импулсних напрезања, а са друге стране за конструкцијом што мање масе и једноставније употребе, налаже да се посебна пажња обрати на што прецизније аналитичко описивање свих појава које се дешавају у оружју, посебно у цеви као најоптерећенијем делу. Цеви стрелачког оружја морају располагати одређеном отпорношћу која ће обезбедити еластичан отпор зидова притиску барутних гасова.

Највећи део топлоте, коју цев оружја прими у току опаљења потиче од ужарених барутних гасова, а мањи део се јавља као последица трења при урезивању и кретању пројектила по жљебовима цеви. Део топлоте коју барутни гасови садрже преноси се, конвекцијом (прелазом) и зрачењем (радијацијом), на граничне слојеве метала на површини канала цеви који на тај начин могу, у веома кратком временском интервалу, достићи веома високе температуре. Топлота се затим, кондукцијом (провођењем) преноси на остале слојеве цеви и друге делове оружја.

При рафалној паљби временски интервал између два опаљења је веома мали (реда величине неколико милисекунди). Због тога количина топлоте коју цев прими не може се у потпуности природном конвекцијом и зрачењем разменити са околином. Као последица се јавља постепено загревање, прво цеви, а затим и других делова оружја (слика 1.1) [2].



Слика 1.1. Шематски приказ

При гађању из оружја цев се загрева и њена температура расте у зависности од броја опаљења, времена у којем су извршена опаљења и димензије цеви. Последице које се јављају услед загревања цеви су:

- смањење живота (издржљивости) цеви,
- снижење механичких карактеристика материјала и смањење отпорности зидова цеви,
- отежано извлачење чаура услед смањења модула еластичности и погоршавања услова предаје топлоте од чауре зидовима цеви,
- отежано нишањење услед струјања топлог ваздуха између задњег и предњег нишана,
- извијање цеви услед неравномерног загревања зидова цеви, а као последица тога појављује се повећано растурање погодака,
- повећање калибра цеви, а услед тога повећано растурање погодака,
- могућност самоопаљења метка који се налази у лежишту при прекиду гађања,
- ограничење режима гађања, односно борбене могућности оружја,
- отежано руковање оружјем при гађању, нарочито при отклањању застоја.

У нормалним условима, припаљивање барутног пуњења врши се пламеном који настаје као резултат активирања иницијалног пуњења у тренутку опаљења, под дејством ударне игле ударног механизма оружја. Међутим, у условима када метак остане дуже времена у загрејаној барутној комори, барутно пуњење може достићи температуру активирања апсорпцијом топлоте кроз зидове чауре и тада настаје појава неконтролисане дефлаграције барутног пуњења. Ова појава се уобичајено назива самоопаљење метка и може имати негативне последице по оружје и стрелца који га користи. У табели 1.1 су дати подаци о броју самоопаљења код америчког митраљеза STONER 5,56 mm у зависности од брзине гађања, броја испалених метака, временског интервала у коме је вршено гађање и температуре цеви [2].

При брзини од 240 мет/мин у трајању од 1 минута, нема ниједног самоопаљења, док су при брзини гађања од 80 мет/мин у трајању од 4 минута била 42 самоопаљења, за приближно исти степен гађања. Закључује се да је фактор који највише утиче на појаву самоопаљења време које протекне од почетка гађања. Опасност од самоопаљења се смањује уколико конструкционо решење аутоматског оружја обезбеђује што краћи временски период од увођења метка у загрејану барутну комору до опаљења.

Табела 1.1. Број самоопаљења за различите брзине гађања

Ред. бр.	Брзина гађања [мет/мин]	Број испалених метака	Време [мин]	Температура цеви [°C]	Број самоопаљења
1.	240	240	1	350	ниједно
2.	120	360	3	400	16
3.	120	300	2,5	380	38
4.	80	320	4	380	42
5.	80	280	3,5	375	35
6.	80	240	3	340	ниједно

Критеријум сигурности од опаљења представља температурна граница од 250°C на спољној површини цеви, непосредно испред почетка ожљебљеног дела цеви. Ако се температура на том делу цеви задржи само неколико милисекунди пре него што се цев охлади на температуру мању од 200°C, врло је вероватно да неће доћи до самоопаљења. Ако је температура цеви изнад 250°C у трајању дужем од 1 минута, постоји опасност да, под условом да метак остане у барутној комори, дође до самоопаљења [2].

У току гађања цев је изложена трошењу, које настаје због механичког, абразивног дејства барутних гасова и пројектила, а испољава се као скидање и одношење честица метала са унутрашње површине цеви. Повећању хабања, односно смањењу радног века цеви, код аутоматског оружја знатно доприносе процеси који настају као последица интензивног загревања при рафалној паљби.

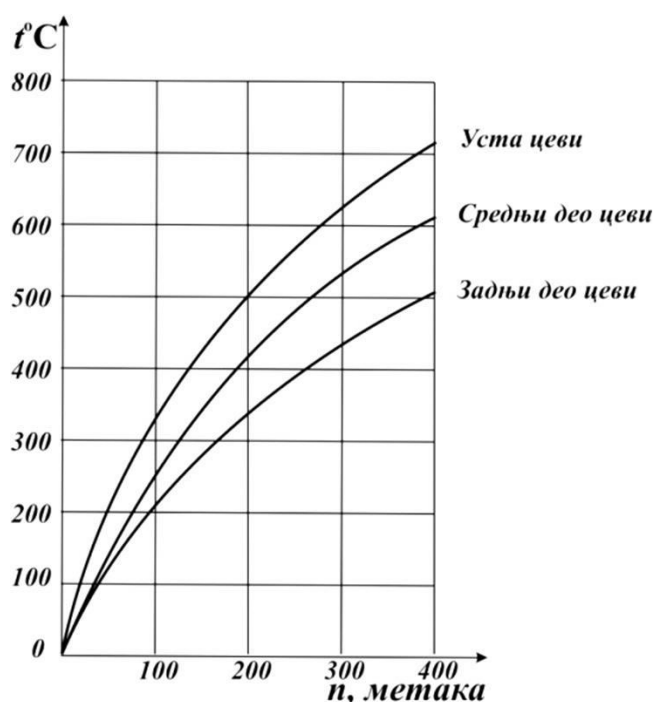
При сваком опаљењу, док је пројектил још у цеви, нагли пораст температуре изазива ширење танког слоја метала на унутрашњој површини цеви. Слободно ширење тог слоја ограничено је због постојања дебљег релативно хладнијег метала који га окружује, па се као резултат јављају термичка компресиона напрезања на површини канала цеви која знатно увећавају напрезања изазвана порастом притиска барутних гасова.

У периоду када барутни гасови који се крећу за пројектилом напусте цев, мање загрејани спољашњи слојеви метала нагло хладе површину канала цеви који због тога бива изложен термичким напрезањима супротног смера (на истезање). Овај процес се понавља при сваком опаљењу и што је већа брзина гађања, термичка напрезања су већа.

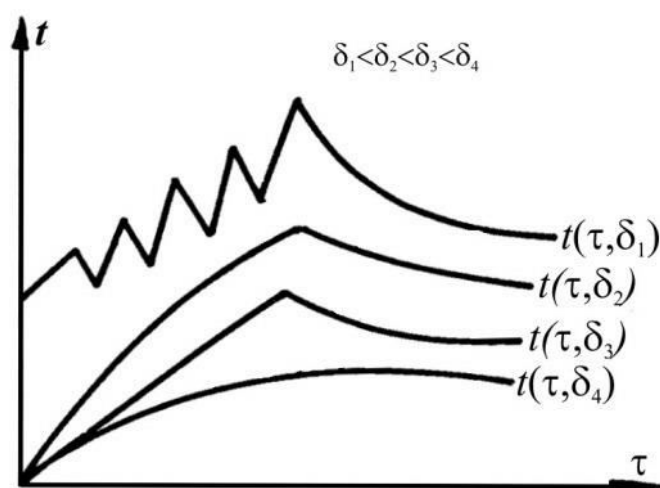
Због наглог ширења и сабијања слоја метала уз површину канала цеви, појачава се замор материјала и долази до појаве напрелина, прво у облику тамних мрља, које се, са повећањем броја испаљених метака, шире и формирају мрежу напрелина, удубљења и шупљина на површини канала цеви. Кроз зазоре између пројектила и цеви, преко ових напрелина струје загрејани барутни гасови и односе са собом честице метала које су, услед високих температура, изгубиле првобитне механичке карактеристике. Струјање загрејаних гасова се може назвати „гасно испирање“ цеви, а укупан, комбиновани механичко-термички процес, који доводи до наглог повећања истрошености и промене геометријске трасе канала цеви, познат је под називом ерозија цеви.

Ерозију изазива још један процес који прати опаљење метка. Барутни гасови садрже, као нуспродукте процеса сагоревања, низ састојака као што су водена пара, водоник, угљен-моноксид, угљен-диоксид, азот, метан и др. Под дејством високог притиска и температуре, азот ступа у реакцију са слојем метала на унутрашњој површини цеви и формира нитридни слој беле боје, који се карактерише високом тврдоћом, малом жилавошћу и подложен је стварању љуспи, тако да олакшава скидање и одношење честица метала и знатно доприноси повећању хабања и ерозије цеви [2].

Загревање цеви није равномерно по дужини (слика 1.2) и дебљини зида цеви (слика 1.3). До неравномерности загревања цеви долази услед различите дебљине зидова цеви, неуједначености температуре и притиска барутних гасова по дужини цеви и различитости у дужини времена деловања барутних гасова на појединим пределима цеви.



Слика 1.2. Промена температуре цеви у зависности од испалених метака



Слика 1.3. Промена температуре цеви у времену за различите дебљине цеви

Брзина ватре, број метака за време опаљења, паузе, дужина паузе и број извршених опаљења у брзом низу су важни фактори у дефинисању делова оружја, температурно отпорних материјала за цев, дебљине зидова цеви и др. На овај начин релативни животни век цеви, могао би се одредити преко темпа опаљења. Често се користи Француски АА темпо опаљења који се састоји од 144 метака од 12 рафала са по 12 метака сваки, са 2 секунде паузе после сваког рафала, и 20 секунди после сваког 4 рафала и на крају хлађењем оружја после задњег опаљења.

За митраљеске цеви, темпо ватре од 250 метака са неколико рафала је често променљив. Фирма Rheinmetall је развила интегрисани систем електронског мерења брзине и темпа ватре преко управљачког склопа за тестирање аутоматског оружја и њихову муницију [1].

2. НАЧИНИ СМАЊЕЊА ЗАГРЕВАЊА ЦЕВИ

Начин смањења загревања цеви (хлађења) се бира у зависности од практичне брзине гађања која се захтева од датог модела оружја. У пракси се примењује више начина за смањење загревања цеви, као што су:

- замена загрејане цеви са хладном цеви,
- повећање спољне површине цеви ради интензивнијег одвођења топлоте са цеви,
- хлађење цеви помоћу течности (најчешће помоћу воде),
- вештачко струјање ваздуха око спољне површине цеви или кроз унутрашњост цеви,
- примена „тешких“ цеви.

Сваки од тих начина смањења загревања цеви има добрих и лоших особина и бира се у зависности од врсте оружја и његових конструктивних карактеристика.

Код оружја којем се може заменити цев резервном, могуће је постићи већу практичну брзину гађања и обезбедити да загревање цеви не прелази дозвољену вредност. Омогућава да се у току гађања, пре него што температура достигне критичну вредност, загрејана цев замени са хладном, чиме се смањују термичка напрезања, хабање и ерозија, односно продужава век трајања. Брзом заменом цеви у току гађања се смањују и ризици од самоопаљења, а и доприноси знатно мањем преносу топлоте са цеви на друге делове оружја. Поред предности, замена цеви има недостатке као што су:

- сложено конструкционо решење оружја и већа маса због потребе за посебним механизмима за замену и учвршћивање цеви,
- израда је скупља,
- постојање друге цеви повећава борбени комплет и отежава услове транспорта и руковања оружјем у борбеним условима.

Без обзира на наведене недостатке, систем замене загрејане цеви са хладном је примењен код великог броја пушкомитраљеза и митраљеза.

На слици 2.1 је приказан митраљез 7,62 mm, где се помоћу ручице окреће у смеру казаљке на сату и повлачи према напред. На исти начин се враћа цев и заротира у супротном смеру од смера казаљке на сату. На овај начин је омогућена брза замена цеви (слике 2.2 и 2.3).



Слика 2.1. Митраљез 7,62 mm M84

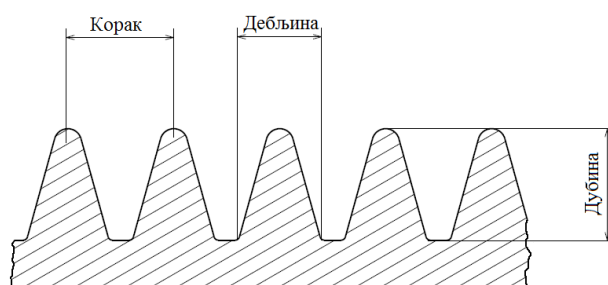


Слика 2.2. Цев митраљеза 7,62 мм М84

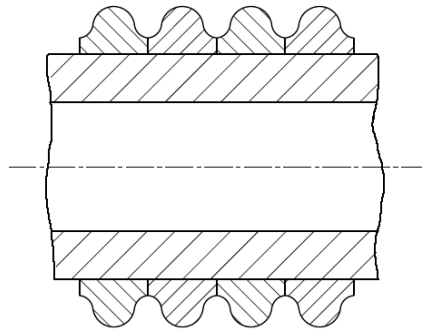


Слика 2.3. Замена загрејане цеви са хладном цеви

Повећањем спољне површине цеви, израдом кружних или уздужних ребара омогућава се интензивније одвођење топлоте са цеви у околну атмосферу, а с тим и брже хлађење цеви. У том случају знатно се поскупљује израда цеви. Већа спољна површина може се добити повећањем спољњег пречника цеви, али би таква цев имала сувише велику масу у односу на друге делове оружја. Мерења код реализованих модела су показала да цеви са ребрима незнатно брже хладе од цеви без ребара, приближно исте масе и дебљине зидова. Ребра се израђују на самој цеви (слика 2.4) или се у облику ребрастих облога од лаких метала навлаче на готову цев (слика 2.5).



Слика 2.4. Ребраста спољна површина



Слика 2.5. Ребраста облога од лаког метала

Ребра могу бити уздужна и попречна. Ефикасност одвођења топлоте зависи од висине, дебљине и међусобног растојања. Свака од ових димензија утиче на степен одвођења топлоте, тако да је потребно наћи компромисно решење. Што је мањи корак ребара, већи је њихов број, па је, самим тим и површина за хлађење већа. Међутим, што је већи број ребара, мањи су међупростори, тако да ребра одају топлоту једно према другом, а не према спољашњој средини [2]. Повећањем спољне површине цеви, методом навлачења посебних облога с ребрима, побољшава се хлађење цеви, али се знатно поскупљује израда, те се овај начин све мање примењује при развоју нових модела оружја.



Слика 2.6. Цев са ребрима код пушкомитраљеза 7,9 mm ZB 30

Код оружја са хлађењем цеви помоћу воде, хлађење се врши помоћу воде која циркулише кроз цилиндрични хладњак навучен на цев. Код овог начина хлађења, топлота цеви се троши на загревање воде, али и њен прелазак из течног у гасовито стање. У хладњак се стављала одговарајућа количина воде. При томе је било неопходно обезбедити заптивање између цеви и зидова хладњака. Код митраљеза калибра 7 до 8 mm хладњак се пунио са 3 до 4 l воде, а код митраљеза калибра 12,7 mm са 5 до 7 l. При хлађењу цеви са водом појављује се нагло снижење температуре цеви при прекиду паљбе. На слици 2.7 је приказан митраљез са хладњаком који се користио у Првом светском рату.



Слика 2.7. Хлађење цеву митраљеза Browning M1917

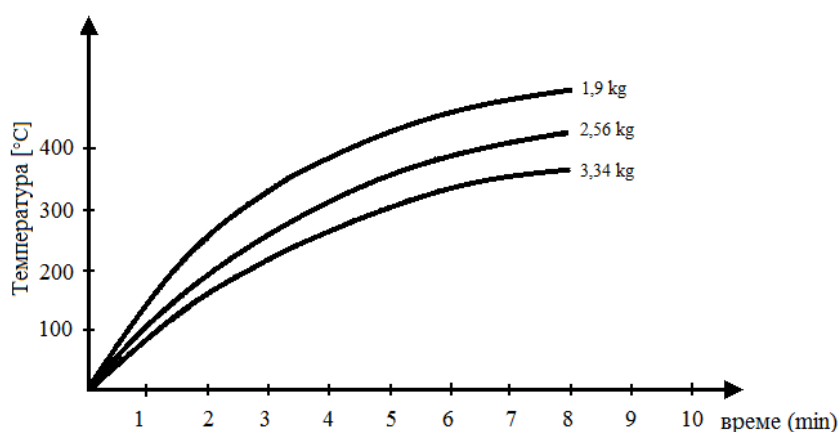
Основни недостаци система хлађења цеви са водом су следећи:

- повећава се маса оружја,
- отежано заптивање хладњака,
- могућност замрзавања воде у хладњаку при ниској околној температури,
- отежана припрема оружја за гађање,
- потребе за обезбеђењем резервне количине воде.

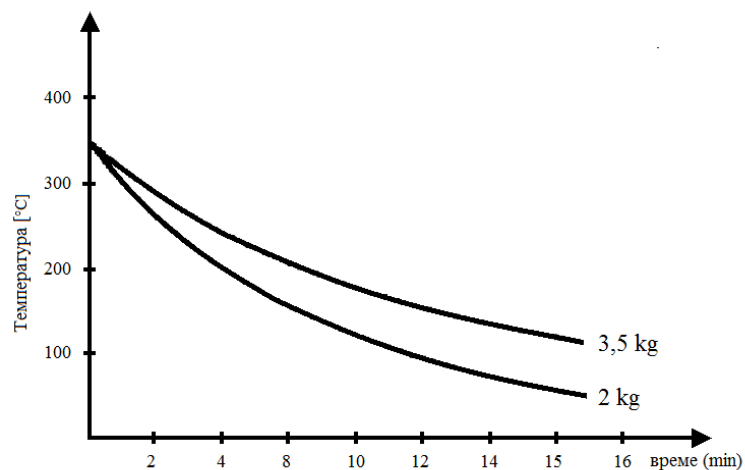
Због тих недостатака хлађење цеви са водом на описани начин се не примењује код оружја која су развијена после Првог светског рата. И поред наведених недостатака, код неких савремених модела аутоматских топова цев се хлади убризгавањем воде у унутрашњост цеви или струјањем водене паре око цеви као што је случај код авионског топа 30 mm ГШ 30/1 на авиону МИГ 29.

Хлађење цеви помоћу вештачког струјања ваздуха око спољне површине цеви или кроз унутрашњост цеви може се користити за хлађење цеви аутоматских оружја уграђених на авионима, бродовима и другим борбеним средствима. Код стрељачких оружја (пиштоља, аутомата, аутоматских пушака и пушкомитраљеза) хлађење цеви се врши ваздухом без замене цеви, а код митраљеза такође ваздухом, при чему је код неких модела могућа брза замена цеви [1].

Један од начина за смањење последица загревања је и примена цеви повећане масе и габарита која се уобичајено назива „тешка“ цев. Оваква цев се у процесу гађања понаша као резервоар топлоте, тако да се спорије загрева и може да издржи оштрије режиме гађања у односу на нормалну „лаку“ цев. Због већих габарита, већа је и спољна површина, па је, самим тим и одвођење топлоте у средину веће. Међутим, повећање спољнег пречника цеви не би смело да пређе одређене границе изнад којих би она постала исувише тешка у односу на остале делове оружја. На слици 2.8 дате су прорачунске криве загревања цеви калибра 5,56 mm различитих маса. Закључује се да повећање масе даје решење за смањење проблема које изазива загревање цеви. Међутим, недостатак „тешке“ цеви је у томе што се она у прекидима гађања много спорије хлади у односу на „лаку“ цев истог калибра, односно временски дуже задржава топлоту. Зависност степена хлађења од масе цеви истог калибра приказана је на слици 2.9.



Слика 2.8. Загревање цеви калибра 5,56 mm различитих маса



Слика 2.9. Криве хлађења цеви истог калибра, различите масе

„Тешке“ цеви су примењене код појединих решења пушкомитраљеза и митраљеза као што су 7,62 mm N-F1, 7,62 mm SIG 710-3, 7,62 mm M59, 12,7 mm Browning M2HB, а обично се ради о варијантама ових оружја које су прилагођене за спрезање са оруђима већег калибра и уградњу на борбена возила. У овим условима повећање масе цеви, односно целог оружја занемарљиво мало утиче на повећање укупне масе возила.

3. МАТЕМАТИЧКИ МОДЕЛ НЕСТАЦИОНАРНОГ ПРОВОЂЕЊА ТОПЛОТЕ КРОЗ ЦЕВ

Проблем загревања цеви у току гађања представља сложен, нестационаран термодинамички процес који се одвија у веома кратким временским интервалима (ред величине неколико стотина делова секунде), па то знатно усложњава његово проучавање и интерпретацију у аналитичком облику. Прорачун параметара који карактеришу температурно поље је веома сложен, а његова сложеност се огледа у немогућности да се добије коректно решење са прихватљивом грешком, које би било једноставно и применљиво у пракси [3].

За одређивање загревања цеви неопходно је знати димензије попречног пресека цеви, врсту материјала, количину топлоте која се ослобађа у цеви и услове преноса топлоте на зидове цеви. Интензитет утицаја барутних гасова зависи од температуре (код стрељачког оружја износи 2000-2500°C) и притиска барутних гасова (3000-4000 bar), али и од карактера њиховог кретања и зато је различит за различите пресеке канала. Разлог томе је што извори загревања цеви, нису само барутни гасови, већ и трење водећег прстена или кошулице пројектила о површину канала. Највећа температура загревања увек ће бити на почетку ожлебљеног дела цеви, што је условљено трењем водећег прстена при његовом урезивању у ожлебљени део цеви. Због кретања пројектила према устима цеви максимална температура унутрашње површине канала опада, на почетку знатно спорије, а према устима цеви брже. Температура у каналу цеви непосредно пре опаљења метка је одлучујућа за процес хабања и зависи од каденце, тј. брзине гађања. Тачно решење тог проблема, чак и при употреби рачунара, тешко је наћи. Тражене величине, неопходне за решење проблема температурних поља, могуће је одредити тек приближно, а често и са великом грешком. Разлог томе је непознавање динамичких зависности параметара стања гасног тока и материјала цеви. Ова анализа је направљена с циљем појашњења појаве настајања температурних поља у цевима оружја и оруђа. Тежиште анализе чини математички модели којима се што реалније описују веома сложени термодинамички процеси и тражи се нумеричко решење које је прихватљиво за инжењерску праксу.

Најважнији задатак који се поставља пред теорију преноса топлоте је одређивање температурних поља у цеви оружја које даје конкретне податке за рачунање и одређивање живота цеви. Као критеријум за одређивање живота цеви служе следеће појаве:

- пад почетне брзине до одређене вредности,
- повећање растурања погодака, на одређено одстојање,
- појава бочних зрна и
- стање површине унутрашњости цеви (уништена поља на одређеној дужини, повећан калибар...).

Живот цеви је изузетно значајно питање, обзиром да је цев најоптерећенији део оружја. Није ретка појава да је радни век аутоматике, у целини, већи неколико пута од живота једне цеви. Ова диспропорција у трајању приморава да се питању повећања живота цеви посвети најозбиљнија пажња.

Специфичност процеса загревања цеви је у томе што се, временски интервал у току кога цев добија топлоту, израчунато за свако опаљење, мери стотим делом секунде. Како испитивања показују у слојевима дебљине реда стотих делова милиметра, температура загревања достиже веома високу вредност. Распоред температуре по дебљини

унутрашњих слојева цеви брзо опада и због тога, при опаљењу, само незнатна количина топлоте пролази ка спољној површини цеви.

3.1. Примена методе коначних разлика на математички модел нестационарног провођења топлоте кроз цев

Разматрање преноса топлоте са барутних гасова на цев оружја представља саставни део проучавања отпорности и оштећења цеви. За проучавање је потребно знати температуру унутрашње површине цеви, јер она делује на физичке и хемијске процесе у близини и на самој површини цеви. Велики број истраживачких радова у литератури за одређивање температуре цеви оружја примењује методу коначних разлика [4].

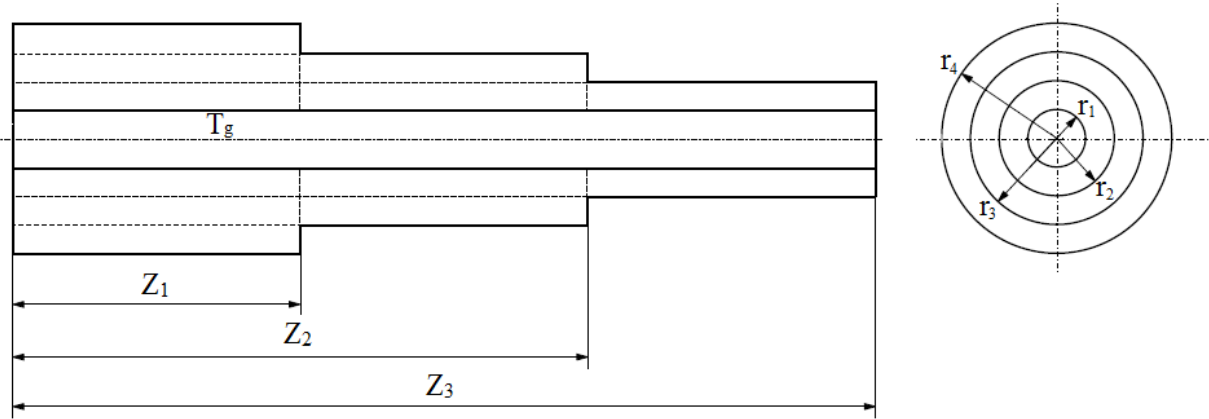
Одређивање термичких напрезања у цеви представља неопходан услов за њено правилно димензионисање. Познавање пренете топлоте са барутних гасова на цев потребно је за потпуније проучавање процеса и њених енергетских могућности. Сам процес преноса топлоте у цеви се може при проучавању поделити на разматрање пет основних проблема:

- одређивање термохемијских карактеристика продуката сагоревања барута,
- нестационарно невискозно струјање стишљивог гаса кроз цев (струјање у „језгру“),
- нестационарно вискозно струјање на површини цеви (гранични слој),
- нестационарно провођење топлоте кроз цев и
- нестационарна слободна конвекција и радијација са спољне површине цеви.

У овом поглављу је обрађен проблем нестационарног провођења топлоте кроз цев. Процес хлађења цеви није обухваћен. За дефинисање математичког модела усвајају се следеће претпоставке:

- материјал цеви је изотропан,
- термичке особине материјала су познате функције температуре,
- угаоне промене температуре цеви су мале у поређењу са радијалним и аксијалним променама, а то значи да се практично разматра дводимензионално температурно поље у цеви,
- топлотни флуks са барутних гасова на површину цеви је одређен тј. познати су температура барутних гасова и коефицијент прелаза топлоте са барутних гасова на цев оружја и
- континуална промена спољног пречника цеви може се адекватно апроксимирати коначним бројем степенастих промена спољног пречника.

На слици 3.1 приказана је апроксимација стварне спољне трасе цеви. Број степенастих промена може да буде већи од три зависно од конкретне ситуације, а софтверско решење је написано тако да се користи било који број степенастих пречника спољне трасе цеви [3].



Слика 3.1. Апроксимација спољне трасе цеви

Једначина провођења топлоте кроз цев има облик:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + \frac{1}{\rho C} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (3.1)$$

где су:

T – температура материјала цеви,

t – тренутак у којем делић цеви са координатама r и z има температуру T ,

r – радијална координата делића цеви,

z – аксијална координата делића цеви.

Претходна парцијална диференцијална једначина је нелинеарна пошто су параметри материјала цеви зависни од температуре [3].

Гранични услови су:

$$r = R_1 \quad 0 \leq z \leq z_3 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(R_1, z, t) = q_2(R_1, z, t) \quad (3.2)$$

$$r = R_4 \quad 0 \leq z \leq z_1 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(R_4, z, t) = \alpha[T(R_4, z, t) - T_0] + \varepsilon\sigma[T^4(R_4, z, t) - T_0^4] \quad (3.3)$$

$$r = R_3 \quad z_1 \leq z \leq z_2 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(R_3, z, t) = \alpha[T(R_3, z, t) - T_0] + \varepsilon\sigma[T^4(R_3, z, t) - T_0^4] \quad (3.4)$$

$$r = R_2 \quad z_2 \leq z \leq z_3 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(R_2, z, t) = \alpha[T(R_2, z, t) - T_0] + \varepsilon\sigma[T^4(R_2, z, t) - T_0^4] \quad (3.5)$$

$$0 < r < R_2 \quad z = 0 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}(r, 0, t) = q_6(r, 0, t) \quad (3.6)$$

$$R_3 < r < R_4 \quad z = z_1 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}(r, z_1, t) = 0 \quad (3.7)$$

$$R_2 < r < R_3 \quad z = z_2 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z}(r, z_2, t) = 0 \quad (3.8)$$

$$R_1 < r < R_2 \quad z = z_3 \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial r}(r, z_3, t) = \alpha[T(r, z_3, t) - T_0] + \varepsilon\sigma[T^4(r, z_3, t) - T_0^4] \quad (3.9)$$

Почетни услови:

$$T(r, z, 0) = T_i(r, z)$$

где су:

R – полупречник цеви,

q – топлотни флуks,

ε – емисивност материјала цеви,

C – коефицијент радијације,

λ – коефицијент топлотне проводљивости,

α – коефицијент прелаза топлоте,

σ – Штефан-Болцманова константа.

Топлотни флуks у изразу (3.2) се одређује као:

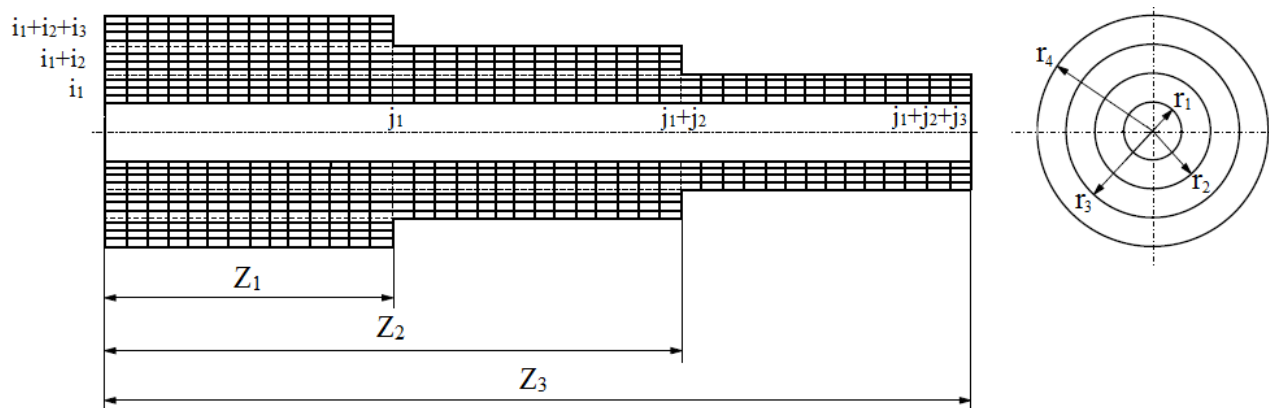
$$q_2(R_1, z, t) = \alpha(R_1, z, t)[T_g(0, z, t) - T(R_1, z, t)] \quad (3.10)$$

Топлотни флуks q_6 у једначини (3.6) мора бити такође одређен. Ова површина може одавати топлоту околини или је измењивати са неким другим делом оружја.

Систем једначина (3.2) до (3.10) не може се решити аналитичким путем, па се морају користити нумеричке методе. У овом математичком моделу коришћен је експлицитни метод коначних разлика [3].

3.2. Нумерички алгоритам за програмско решење

Да би се одредио распоред температура у цеви, цев се дели на коначан број малих сегмената по уздужном пресеку (слика 3.2). Цев је подељена на три дела у радијалном и аксијалном правцу. Број чворних линија у првом радијалном делу је i_1 , укључујући и границу дела један и два. Други и трећи радијални одељак садрже i_2 и i_3 чворних линија, респективно. У првом аксијалном сегменту има j_1 чворних линија укључујући чворну линију на граници. Други и трећи аксијални сегмент садржи j_2 и j_3 чворних линија, респективно.



Слика 3.2. Чворне тачке и линије мреже коначних разлика

Претпоставка да је температура у сваком сегменту униформна и једнака оној у средишту сегмента. Просторни изводи се јављају у једначини и апроксимирају се преко релација са коначним разликама који се добијају развијањем у Тејлоров ред:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_{n,m} = \frac{\lambda_{n,m}}{\rho_{n,m} C_{n,m}} \left[\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right)_{n,m} + \frac{1}{r_n} \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{n,m} \right] + \frac{1}{\rho_{n,m} C_{n,m}} \frac{\partial \lambda_{n,m}}{\partial T} \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{n,m}^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{n,m}^2 \right] \quad (3.11)$$

Индекси:

n – означава радијални положај чвора и

m – означава аксијални положај чвора.

Индекси код параметара материјала показују да су и они одређени за температуру чвора n , m :

$$\lambda_{n,m} = \lambda(T_{n,m}) \quad (3.12)$$

Гранични услови морају бити написани у облику коначних разлика, на пример једначина (3.2):

$$-\lambda_{1,m} \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right) = q_{2,1,m} \quad (3.13)$$

Систем експлицитних алгоритамских једначина се добија за временску промену температуре у сваком чвору. Ове брзине промене се множе са коначним временским порастом да би се нашла температура у тренутку који одговара једном прирасту времена. Поступак се понавља док се не постигне жељени временски интервал.

Изрази који су коришћени да се просторни извод апроксимира помоћу коначних разлика дати су у табелама 3.1 и 3.2. Изрази, дати у табелама 3.1 и 3.2 се односе на радијални правац. За аксијални правац изрази су истог облика при чему се прираст Δr замењује са Δz , а n је фиксиран, а m је променљив. Који ће се израз користити зависи од положаја чворова. За унутрашње чворове користи се израз бр. 2 табела 3.1 и израз бр. 3 табела 3.2. На унутрашњој површини цеви користи се други извод израз бр. 1 табела 3.2, а први извод се одређује из граничних услова и израза бр. 4 табела 3.2. Изводи у чворовима непосредно до граница су дати изразима бр. 1 и 3 табела 3.1 и израз бр. 2 табела 3.2. чворови на границама између одељака цеви се третирају помоћу израза број 4 табела 3.1 и

израза бр. 3 табела 3.2, пошто прирасти могу бити између чворова неједнаке величине. Максималан прираст времена при којем је обезбеђена стабилност решења једначине 3.1 према [3] је:

$$\Delta t = \rho C \frac{\Delta x^2}{\lambda w} \quad (3.14)$$

где је Δx - растојање међу чворовима и:

$$w = 4 + 4 \frac{\alpha \Delta x}{\lambda} \quad (3.15)$$

Табела 3.1. Изрази за радијални правац

Ред. бр.	$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{n,m}$
1.	$\frac{1}{6\Delta r} [-2T_{n-1,m} - 3T_{n,m} + 6T_{n+1,m} - T_{n+2,m}]$
2.	$\frac{1}{12\Delta r} [T_{n-2,m} - 8T_{n-1,m} + 8T_{n+1,m} - T_{n+2,m}]$
3.	$\frac{1}{6\Delta r} [T_{n-2,m} - 6T_{n,m} + 3T_{n,m} + 2T_{n+1,m}]$
4.	$\frac{1}{6r_2 \left(1 + \frac{\Delta r_2}{\Delta r_1}\right)} \left[T_{n+1,m} - T_{n,m} \left(1 - \frac{\Delta r_2^2}{\Delta r_1^2}\right) - \frac{\Delta r_2^2}{\Delta r_1^2} T_{n-1,m} \right]$

Табела 3.2. Изрази за радијални правац

Ред. бр.	$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}\right)_{n,m}$
1.	$\frac{1}{18\Delta r^2} [-85T_{n,m} + 108T_{n+1,m} - 27T_{n+2,m} + 4T_{n+3,m}] - \frac{11}{3\Delta r} \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{n,m}$
2.	$\frac{1}{\Delta r^2} [T_{n+1,m} - 2T_{n,m} + T_{n-1,m}]$
3.	$\frac{1}{12\Delta r^2} [-T_{n-2,m} + 16T_{n-1,m} - 30T_{n,m} + 16T_{n+1,m} - T_{n+2,m}]$
4.	$\frac{1}{18\Delta r^2} [-85T_{n,m} + 108T_{n-1,m} - 27T_{n-2,m} + 4T_{n-3,m}] + \frac{11}{3\Delta r} \left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{n,m}$
5.	$\frac{2}{\Delta r_1 \Delta r_2 + \Delta r_2^2} \left[\frac{\Delta r_2}{\Delta r_1} T_{n-1,m} - \left(\frac{\Delta r_2}{\Delta r_1} + 1\right) T_{n,m} + T_{n+1,m} \right]$

3.3. Програмско решење

На бази претходно изложеног нумеричког алгоритма формирано је програмско решење TEZ у програмском језику FORTRAN за PC дато у Прилогу 1. Програмско решење TEZ омогућује одређивање дводимензионалног температурног поља у цеви оружја под реалним физичким условима. Одређивање температурног поља цеви аутоматског оружја при гађању рафалном палбom је јако компликовано, јер се услови простирања топлоте мењају од опаљења до опаљења.

Програм сачињавају шест целина. Прва целина је главни програм у коме се на почетку даје номенклатура величина коришћених у програму. Следећих пет целина представљају потпрограме које користи у одређеној фази прорачуна главни програм. Потпрограми су:

COND - служи за одређивање коефицијента провођења топлоте материјала цеви у зависности од температуре,

QRSUB - служи за израчунавање радијалног топлотног флуksа услед радијације и конвекције на спољној површини,

QZSUB - служи за израчунавање аксијалног топлотног флуksа услед радијације и конвекције на спољној површини,

RADSUB - служи за израчунавање извода у радијалном правцу и

AKSSUB - служи за израчунавање извода у аксијалном правцу.

Улазни фајл - датотеку чине следећи полазни подаци:

M - број радијалних сегмената у апроксимираном уздужном пресеку цеви,

N - број аксијалних сегмената у апроксимираном уздужном пресеку цеви,

SIG - Штефан-Болцманова константа,

TS - температура спољне средине,

NR - редни број итерације која ће се штампати,

XCP - коефицијент специфичне топлоте материјала цеви,

TZMAX - максимална температура унутрашње површине цеви,

TZMIN - минимална температура унутрашње површине цеви,

XHMAX - максималан коефицијент прелаза топлоте са барутних гасова на зидове цеви,

XHMIN - минималан коефицијент прелаза топлоте са барутних гасова на зидове цеви,

RHD - густина материјала цеви,

TG - температура барутних гасова (средња температура),

XH - средњи коефицијент прелаза топлоте са барутних гасова на зидове цеви,

JJS(I) - број радијалних чворних линија у i-том радијалном сегменту,

LLS(J) - број аксијалних чворних линија у j-том аксијалном сегменту,

RS(I) - радијалне границе између сегмената,

ZS(J) - аксијалне границе између сегмената и

KRA(I) - број радијалних сегмената у i-том аксијалном сегменту.

Излазни фајл чине поред величина из улазног фајла и следеће величине:

JSUM - број радијалних чворова на аксијалним линијама у одређеном аксијалном сегменту и

TM - време у којем се израчунава температурно поље.

Програм штампа време у односу на почетак процеса, а затим температурно поље по аксијалним линијама и то тако да се температуре штампају од унутрашње ка спољној површини цеви. Температуре су дате у степенима Целзијуса. Наведени математички и симулациони модел је намењен за јединачну паљбу, зато се у раду неће упоређивати са експерименталним резултатима.

Метода коначних разлика се користи као уобичајен поступак решавања диференцијалних једначина у инжењерској пракси. Она је сложена за прорачун, а њена примена у савременим условима је знатно олакшана применом рачунарских система. Данас су развијени многи софтери који омогућавају симулације, као што су програмски пакети Catia, ProEngineer, Inventor, и др.

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСПИТИВАЊЕ ЗАГРЕВАЊА СПОЉНЕ ТРАСЕ ЦЕВИ

Експеримент се састоји из мерења спољне трасе цеви код аутоматске пушке 5,56 mm M21 А. Извршен је на собној температури од 24,1°C са опремом за мерење температуре. Претходно је припремљено оружје и муниција. Мери се температура на местима приказаним бројевима 1, 2 и 3 на слици 4.1.



Слика 4.1. Мерење температуре спољне трасе цеви на местима 1, 2 и 3

Прво мерење температуре извршено је након опаљења једног метка из оружја (слике 4.2 и 4.3).



Слика 4.2. Гађање из аутоматске пушке 5,56 mm M21 А



Слика 4.3. Мерење температуре на почетку цеви

Измерене температуре након испалењог једног метка приказане су у табели 4.1 за сва три места (лежиште метка, средњи део цеви и уста цеви).

Табела 4.1. Измерене температуре након првог гађања

Ред.бр.	Време [sec]	Температура [°C] (лежиште метка)	Температура [°C] (средњи део цеви)	Температура [°C] (уста цеви)
1.	0	27	27	27

Након тога из оружја је испалењено 5 метака јединачном паљбом, где су измерене температуре приказане у табели 4.2.

Табела 4.2. Измерене температуре након другог гађања

Ред.бр.	Време [sec]	Температура [°C] (лежиште метка)	Температура [°C] (средњи део цеви)	Температура [°C] (уста цеви)
1.	0	43,7	41	41,1
2.	40	39,5	39,2	40,3
3.	80	36,8	41,4	39,2
4.	120	34,9	39,8	39,7

Затим је извршено гађање са свим мецима из оквира (30 метака), при чему је првих 5 метака испалењено јединачном паљбом, а остали аутоматском паљбом у кратким рафалима (3-5 метака). Измерене температуре приказане у табели 4.3.

Табела 4.3. Измерене температуре након трећег гађања

Ред.бр.	Време [sec]	Температура [°C] (лежиште метка)	Температура [°C] (средњи део цеви)	Температура [°C] (уста цеви)
1.	0	113,5	113	115
2.	49	95,3	106,8	104
3.	77	92,1	113,4	102,3
4.	105	78,2	99	98,6
5.	136	77,2	98	96,4

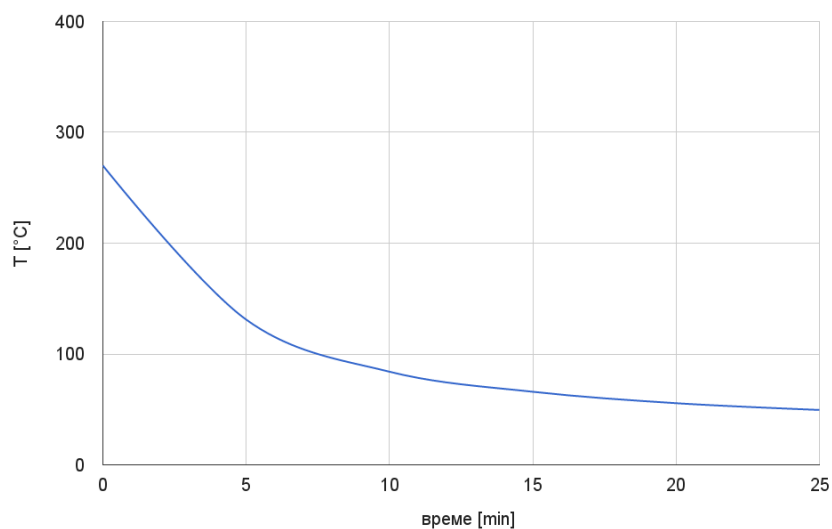
Током следећег гађања искоришћено је пет оквира, тако што се првих пет метака из првог оквира гађало јединачном палбom, а остали меци из истог оквира аутоматском палбom у кратким рафалима (3-5 метака). Затим други оквир аутоматском палбom у непрекидном рафалу. Трећи оквир је искоришћен за поступак гађања као за први оквир, четврти оквир за поступак гађања као за други оквир, и на крају последњи оквир као за први оквир. Измерене температуре након гађања приказане су у табели 4.4, а у табели 4.5 приказан је пад температуре у току 25 минута, као и дијаграми опадања (слике 4.4, 4.5, 4.6 и 4.7).

Табела 4.4. Измерене температуре након четвртог гађања

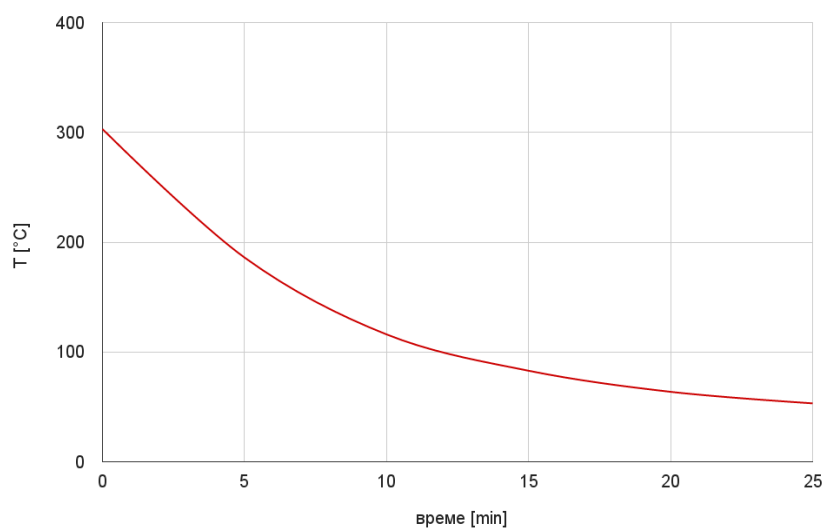
Ред.бр.	Време [sec]	Температура [°C] (лежиште метка)	Температура [°C] (средњи део цеви)	Температура [°C] (уста цеви)
1.	0	270	303	293
2.	56	220	262	274
3.	82	204	278	237
4.	114	190	262	228
5.	150	280	248	207
6.	187	170	196	204
7.	223	159	226	261
8.	251	149	215	202
9.	276	143	205	183
10.	300	131	186	183

Табела 4.5. Измерене температуре након последњег гађања

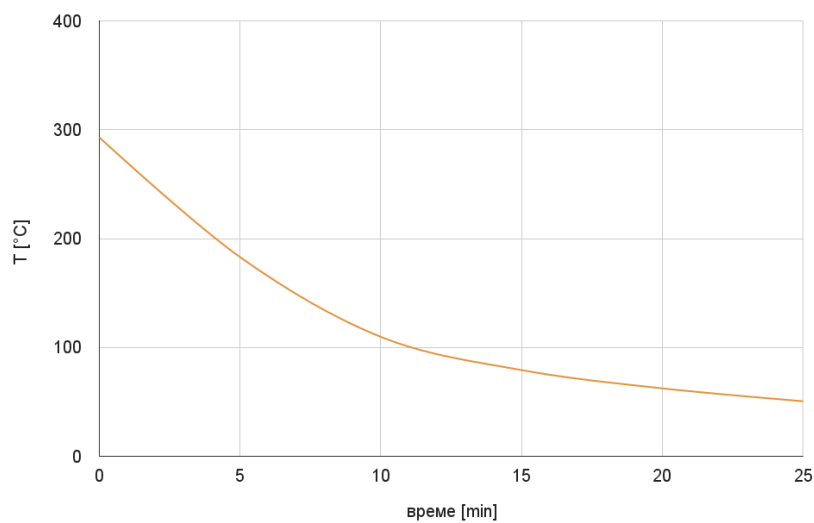
Ред.бр.	Време [min]	Температура [°C] (лежиште метка)	Температура [°C] (средњи део цеви)	Температура [°C] (уста цеви)
1.	0	270	303	293
2.	5	131	186	183
3.	10	84	116	109,7
4.	15	65,9	82,9	79,2
5.	20	55,6	63,7	62,4
6.	25	49,5	53,2	50,6



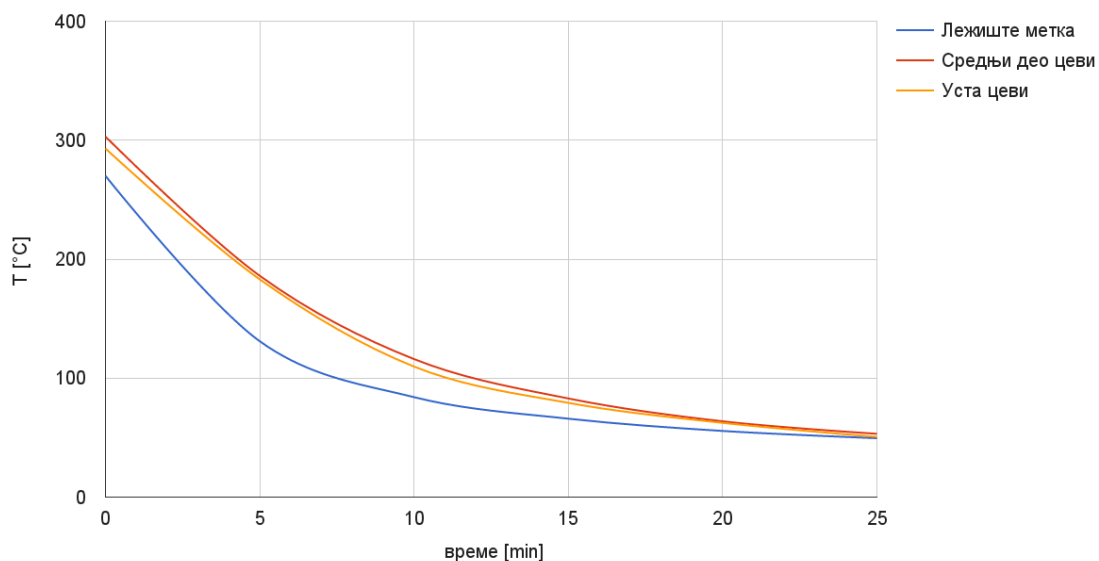
Слика 4.4. Опадање температуре током времена (лежиште метка)



Слика 4.5. Опадање температуре током времена (средњи део цеви)



Слика 4.6. Опадање температуре током времена (уста цеви)

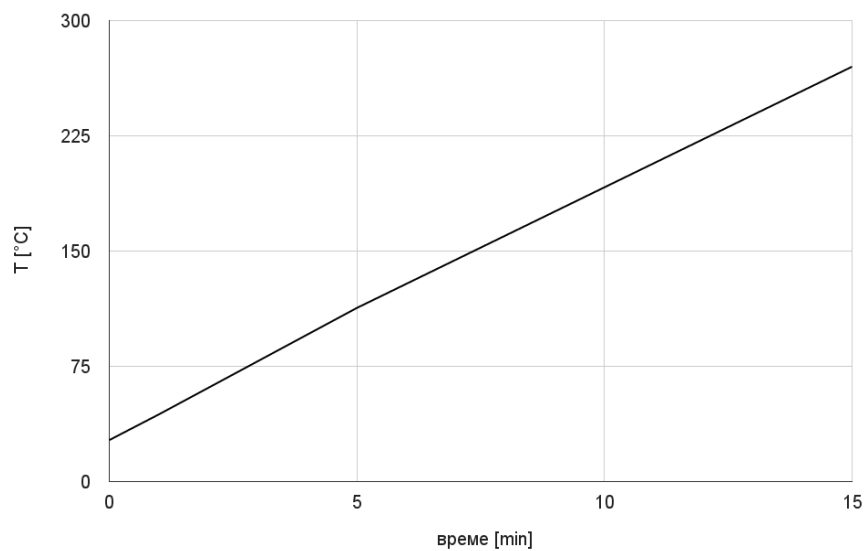


Слика 4.7. Општање температуре током времена

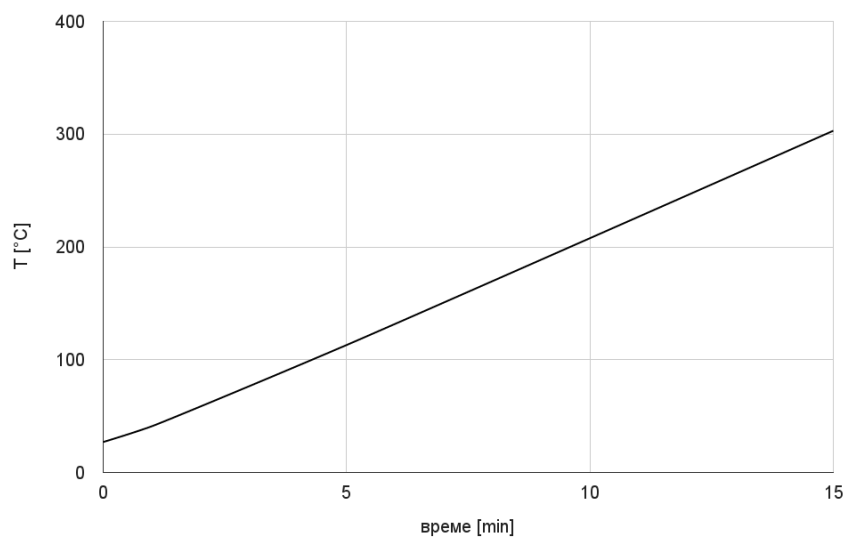
У табели 4.6 су приказане температуре након сваког гађања, оне представљају максималну температуру коју је цев достигла након сваког гађања. На следећим сликама су приказани дијаграми пораста температуре за лежиште метка, средњи део цеви и уста цеви.

Табела 4.6. Пораст температуре након сваког гађања

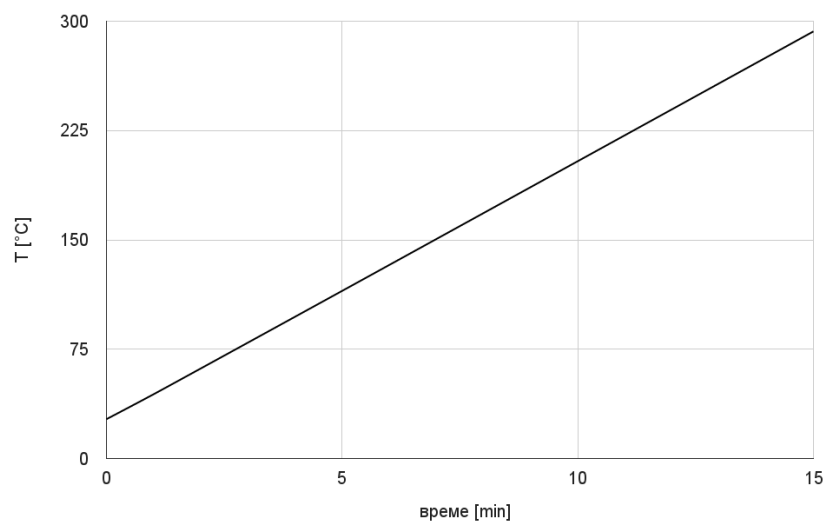
Ред.бр.	Време [min]	Температура [$^{\circ}\text{C}$] (лежиште метка)	Температура [$^{\circ}\text{C}$] (средњи део цеви)	Температура [$^{\circ}\text{C}$] (уста цеви)
1.	0	27	27	27
2.	1	43,47	41	44,1
3.	5	113	113	115
4.	15	270	303	293



Слика 4.8. Пораст температуре за лежиште метка



Слика 4.9. Пораст температуре за средњи део цеви



Слика 4.10. Пораст температуре на устима цеви

5. ЗАКЉУЧАК

На основу дијаграма који су направљени помоћу података добијених у експерименту, може се уочити да се при гађању рафалном палбом веома брзо постижу високе температуре. Одавање топлоте од цеви у спољну средину природном конвекцијом и зрачењем је споро и мало.

Величине измерених температура у различитим пресецима, у овом случају се подразумевају измерене величине на почетку цеви, на средини и на крају цеви, су различите и зависе од дејства барутних гасова на зидове цеви, као и од законитости промене притиска и температуре барутних гасова по дужини цеви. Највећу температуру достиже средњи део цеви, затим уста цеви, па лежиште метка. Када се посматра опадање температуре након последњег гађања, уочава се да се цев споро хлади, тако да је после 25 минута, температура опала у просеку око 200°C. Значајно је и да температура код лежишта метка буде мања, под условом да је метак још у цеви, како не би дошло до самоопаљења.

У поређењу са теоријским знањем приказаним у раду, уочавају се разлике код загревања на устима цеви и средишту цеви. У раду је приказано да је највећа температура на устима цеви, затим на средини цеви, док је код извођења експеримента добијена највећа температура на средини цеви, а на устима цеви температура је приближна температури средишта цеви.

У експерименту, на средњем делу цеви чија се температура мерила, налази се рукохват. Топлота се кондукцијом преноси на рукохват, тако да после извесног времена долази до прегревања, чиме се отежава руковање.

Поред тога што се теже рукује оружјем и ризика од самоопаљења, услед загревања цеви, долази до снижења механичких карактеристика материјала цеви, појачаног хабања, ерозије и др. Сви ови проблеми представљају главне узроке смањења живота цеви. Данас постоји велики број истраживачких радова који се баве проблемом загревања цеви оружја и налажењем начина ублажавања последица насталих загревањем цеви. Као што је наведено у раду, користе се различити поступци засновани на избору материјала цеви побољшаних карактеристика, примени „тешке“ цеви, примена методе замене цеви повећању спољне површине цеви и др. Сви ови поступци имају добре и лоше карактеристике и примењују се у зависности од врсте и калибра оружја и од захтева које оно треба да испуни у борбеним условима.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] С. Илић, А. Кари, *Основи конструкције наоружања*, Медија центар Одбрана, Београд, 2015.
- [2] П. Радовић, *Неки аспекти процеса загревања цеви аутоматског оружја у току гађања*, ВТИ Београд, 1984.
- [3] Љ. Танчић, *Унутрашње балистичко пројектовање*, уџбеник, ВА, Београд, 2010.
- [4] Mishra A., Hameed A. & Lawton B., *A Novel scheme for computing gun barrel temperature history and its experimental validation*, Journal of Pressure Vessel Technology: Transactions of ASME, Volume 132, 2010.

Прилози

```

*****
C *
*
C * P R O G R A M T E Z
*
C *
*
C
*****
C *
*
C * PROGRAM ZA ODREDJIVANJE DVODIMENZIJONOG TEMPERATURNOG
*
C * POLJA U CEVI ORUZJA METODOM KONACNIH RAZLIKA
*
C *
      PROGRAM TEZ
      DIMENSION T(30,20),QR(30,20),QZ(30,20),DR(10),DZ(10)
      DIMENSION DTR(30,20),DTZ(30,20),DTZ2(30,20),JJS(10),LLS(10)
      DIMENSION ZS(10),XJS(10),XLS(10),KRA(10)
      DIMENSION DTR2(30,20),RS(11),DT(300),R(30),TC(30,20)
      COMMON JSUM(10),N,NKO,ISUM,LL1,M,SIG,TS
      OPEN(11,FILE='ULTEZDR.DAT')
      OPEN(21,FILE='IZTEZDR.DAT')
      READ(11,*) M,N,SIG,TS,TTM,NR,XCP
      READ(11,*) TZMAX,TZMIN,XHMAX,XHMIN,RHD,TG,XH
      READ(11,*) (JJS(I),I=1,M)
      READ(11,*) (LLS(J),J=1,N)
      MP1=M+1
      READ(11,*) (RS(I),I=1,MP1)
      READ(11,*) (ZS(J),J=1,N)
      READ(11,*) (KRA(I),I=1,N)
      READ(11,*) (JSUM(I),I=1,N)
      WRITE(21,701)
701  FORMAT (5X,'TZ (MAX) ',3X,'TZ (MIN) ',3X,'XM (MAX) ',2X,'XM (MIN) ',
+ 5X,'RHD',7X,'TG',8X,'XH')
      WRITE(21,702) TZMAX,TZMIN,XHMAX,XHMIN,RHD,TG,XH
702  FORMAT(7F10.0/)
      WRITE(21,501)
501  FORMAT(5X,'M',5X,'N',8X,'SIGMA',10X,'TS',10X,'TTM',
+ 5X,'NR',6X,'CP')
      WRITE(21,201) M,N,SIG,TS,TTM,NR,XCP
      WRITE(21,502)
502  FORMAT(2X,'J J S')
      WRITE(21,202) (JJS(I),I=1,M)
      WRITE(21,503)
503  FORMAT(2X,'L L S')
      WRITE(21,202) (LLS(J),J=1,N)
      WRITE(21,504)
504  FORMAT(/2X,'R S')
      WRITE(21,203) (RS(I),I=1,MP1)
      WRITE(21,505)
505  FORMAT(/2X,'Z S')
      WRITE (21,203) (ZS(J),J=1,N)
      WRITE (21,506)
506  FORMAT(/2X,'K R A')
      WRITE (21,205) (KRA(J),J=1,N)
508  FORMAT(/2X,'JSUM')

```

```

WRITE (21, 508)
WRITE (21, 299) (JSUM(I), I=1, N)
299  FORMAT(4I10/)
201  FORMAT(2I6, 4X, E12.5, 2F11.2, I8, F10.3, /)
205  FORMAT(4I10/)
202  FORMAT(4I10/)
203  FORMAT(4F10.4/)
DO 300 I=1, MP1
RS(I)=RS(I)/0.3048
300  CONTINUE
DO 301 J=1, N
ZS(J)=ZS(J)/0.3048
301  CONTINUE
SIG=1.79735E-8
TS=9.*TS/5.+32.
TZMAX=9.*TZMAX/5.+32.
TZMIN=9.*TZMIN/5.+32.
XHMAX=XHMAX/5.67826
XHMIN=XHMIN/5.67826
XH=XH/5.67826
RHD=RHD/16.0185
TG=9.*TG/5.+32.
XCP=XCP/4.1868
ISUM=0
DO 4 I=1, N
ISUM=ISUM+LLS(I)
4  CONTINUE
C PRORACUN DR I DZ
DO 6 J=1, M
XJS(J)=JJS(J)
6  CONTINUE
DO 7 I=1, N
XLS(I)=LLS(I)
7  CONTINUE
DZ(1)=ZS(1)/(XLS(1)-1.)
DO 8 I=2, N
DZ(I)=(ZS(I)-ZS(I-1))/XLS(I)
8  CONTINUE
DR(1)=(RS(2)-RS(1))/XJS(1)
R(1)=RS(1)
JKK=2
JJJ=0
DO 11 JK=1, M
IF (JK.EQ.1) GOTO 9
DR(JK)=(RS(JK+1)-RS(JK))/XJS(JK)
JKK=JKK+JJS(JK-1)
9  JJJ=JJJ+JJS(JK)
DO 10 J=JKK, JJJ
R(J)=R(J-1)+DR(JK)
10  CONTINUE
J=JJJ+1
R(J)=RS(JK+1)
11  CONTINUE
TM=0.
NKO=1
TSA=5.*(TS-32.)/9.+273.
IK=1
NN=LLS(1)
DO 18 II=1, N
JSU=JSUM(II)+1

```

```

DO 17 I=IK,NN
DO 17 J=1,JSU
T(I,J)=TS
17  CONTINUE
IF(II.EQ.N) GOTO 18
IK=IK+LLS(II)
NN=NN+LLS(II+1)
18  CONTINUE
C PRORACUN D(TM)MAX
TT=TZMAX
CALL COND (TT,XK,DKT,EMIS,XXHC)
XKMIN=XK
TT=TZMIN
CALL COND (TT,XK,DKT,EMIS,XXHC)
XKMAX=XK
DO 16 I=1,M
XMR=2.+XHMIN*DR(I)/XKMAX
DT(I)=RHD*XCP*DR(I)**2/XKMAX/XMR
16  CONTINUE
DO 19 J=1,N
XMZ=2.+XHMIN*DZ(J)/XKMAX
DT(M+J)=RHD*XCP*DZ(J)**2/XKMAX/XMZ
19  CONTINUE
KINT=M+N
IDT=0
23  IDT=IDT+1
IPT=IDT+1
IF(DT(IDT).GT.DT(IPT)) GOTO 24
DT(IPT)=DT(IDT)
24  IF(IPT.LT.KINT) GOTO 23
DTH=DT(IPT)
DTHL=DTH*3600.
181 CONTINUE
TM=TM+DTH*3600.
C WRITE(21,*) 'TM',TM
CALL QZSUB (TSA,JJS,LLS,T,QZ,KRA,XXHC,EMIS)
CALL QRSUB (T,QR,TSA,LLS,XXHC,EMIS)
CALL RADSUB (T,DR,DTR,DTR2,QR,JJS,LLS,TG,XH,XCP)
CALL AKSSUB (T,DZ,DTZ,DTZ2,QZ,LLS)
IFF=0
DO 539 IK=1,N
IIN=IFF+1
IFF=IFF+LLS(IK)
JSU=JSUM(IK)+1
DO 54 I=IIN,IFF
DO 54 J=1,JSU
TT=T(I,J)
CALL COND (TT,XK,DKT,EMIS,XXHC)
XXK=XK/(RHD*XCP)
DTDT=XXK*(DTR2(I,J)+DTR(I,J)/R(J)+DTZ2(I,J))+DKT*
+ (DTR(I,J)**2+DTZ(I,J)**2)/(RHD*XCP)
T(I,J)=T(I,J)+DTDT*DTH
TC(I,J)=5.*(T(I,J)-32.)/9.
54  CONTINUE
IF(TM.GE.TTM) NKO=NR
IF(NKO.NE.NR) GOTO 539
IF(IK.GT.1) GOTO 1000
WRITE(21,900) TM
900  FORMAT(/,2X,'TM=',F8.4)
1000 CONTINUE

```

```

DO 53 I=IIN, IFF
WRITE (21, 210) I
WRITE (21, 211) (TC(I, J), J=1, JSU)
210  FORMAT (/5X, 'AKSIJALNA LINIJA BR.', I4)
211  FORMAT (6E12.4)
53   CONTINUE
539  CONTINUE
      IF(NKO.NE.NR) GOTO 404
      NKO=0
      WRITE (21, 303)
303   FORMAT (////////)
404   NKO=NKO+1
      IF(TM.LT.TTM) GOTO 181
      CLOSE (11)
      CLOSE (21)
      STOP
      END
C*****
**
C* PROGRAM ZA DEFINISANJE KOEFICIJENTA PROVODJENJA TOPLOTE
C*****
**
      SUBROUTINE COND (TT, XK, DKT, EMIS, XXHC)
      EMIS=0.5
      XXHC=5.0
      IF(TT.GT.1472.) GOTO 15
      XK=28.3-.0087*TT
      DKT=-.0087
      GOTO 20
15    XK=10.39+.00347*TT
      DKT=.00347
20    CONTINUE
      RETURN
      END

C*****
**
C* PODPROGRAM ZA ODREDJIVANJE DT/DR NA SPOLJNIM POVR SINAMA
*
C
*****
      SUBROUTINE QRSUB (T, QR, TSA, LLS, XXHC, EMIS)
      DIMENSION T(30, 20), QR(30, 20), LLS(10)
      COMMON JSUM(10), N, NKO, ISUM, LL1, M, SIG, TS
      IS=0
      DO 27 IK=1, N
      JSU=JSUM(IK)+1
      II=IS+1
      IS=IS+LLS(IK)
      DO 27 I=II, IS
      TAB=5.*(T(I, JSU)-32.)/9.+273.
      TT=T(I, JSU)
      CALL COND(TT, XK, DKT, EMIS, XXHC)
      XXHR=EMIS*SIG*(TAB**3+TAB**2*TSA+TAB*TSA**2+TSA**3)/5.67826
      XXH=XXHC+XXHR
      QR(I, JSU)=XXH*(T(I, JSU)-TS)/XK
27    CONTINUE
      RETURN
      END
C*****

```

```

**
C* PODPROGRAM ZA ODREDJIVANJE DT/DZ NA SPOLJNIM POVR SINAMA
*
C*****
**
      SUBROUTINE QZSUB (TSA,JJS,LLS,T,QZ,KRA,XXHC,EMIS)
      DIMENSION QZ(30,20),T(30,20),JJS(10),LLS(10),KRA(10)
      COMMON JSUM(10),N,NKO,ISUM,LL1,M,SIG,TS
      DO 30 KR=1,N
      ISU=0
      DO 28 IK=1,KR
      ISU=ISU+LLS(IK)
28      CONTINUE
      IF(KR.NE.N) GOTO 29
      JSU=JSUM(N)+1
      DO 31 J=1,JSU
      TAB=5.*(T(ISUM,J)-32.)/9.+273.
      TT=T(ISUM,J)
      CALL COND (TT,XK,DKT,EMIS,XXHC)
      XXHR=EMIS*SIG*(TAB**3+TAB**2*TSA+TAB*TSA**2+TSA**3)/5.67826
      XXH=XXHC+XXHR
      QZ(ISUM,J)=XXH*(T(ISUM,J)-TS)/XK
31      CONTINUE
      GO TO 30
29      JSU=JSUM(KR)+1
      JSU1=JSUM(KR+1)+1
      IF(JSU.EQ.JSU1) GOTO 30
      IF(JSU.LT.JSU1) GOTO 32
      JSU11=JSU1+1
      DO 33 J=JSU11,JSU
      TAB=5.*(T(ISU,J)-32.)/9.+273.
      TT=T(ISU,J)
      CALL COND (TT,XK,DKT,EMIS,XXHC)
      XXHR=EMIS*SIG*(TAB**3+TAB**2*TSA+TAB*TSA**2+TSA**3)/5.67826
      XXH=XXHC+XXHR
      QZ(ISU,J)=XXH*(T(ISU,J)-TS)/XK
33      CONTINUE
      GO TO 30
32      JSUM1=JSU+1
      DO 30 J=JSUM1,JSU1
      TAB=5.*(T(ISU,J)-32.)/9.+273.
      TT=T(ISU,J)
      CALL COND (TT,XK,DKT,EMIS,XXHC)
      XXHR=EMIS*SIG*(TAB**3+TAB**2*TSA+TAB*TSA**2+TSA**3)/5.67826
      XXH=XXHC+XXHR
      QZ(ISU,J)=XXH*(TS-T(ISU,J))/XK
30      CONTINUE
      RETURN
      END
C*****
**
C* PODPROGRAM ZA ODREDJIVANJE DT/DR I D2T/DR2 METODOM KONACNIH RAZLIKA *
C*****
**
      SUBROUTINE RADSUB (T,DR,DTR,DTR2,QR,JJS,LLS,TG,XH,XCP)
      DIMENSION T(30,20),DR(10),DTR(30,20),DTR2(30,20),QR(30,20)
      DIMENSION JJS(10),LLS(10)
      COMMON JSUM (10),N,NKO,ISUM,LL1,M,SIG,TS
      IFT=1
      ILA=LLS(1)

```

```

DO 40 IK=1,N
JR=M
DO 34 I=IFT,ILA
TT=T(I,1)
CALL COND (TT,XK,DKT,EMIS,XXHC)
QR(I,1)=XH*(TG-T(I,1))/XK
DTR(I,1)=-QR(I,1)
DTR2(I,1)=(-85.*T(I,1)+108.*T(I,2)-27.*T(I,3)+4.*T(I,4))
+ / (18.*DR(1)**2)+11.*QR(I,1)/DR(1)/3.
DTR(I,2)=(-2.*T(I,1)-3.*T(I,2)+6.*T(I,3)-T(I,4))/DR(1)/6.
DTR2(I,2)=(T(I,3)-2.*T(I,2)+T(I,1))/DR(1)**2
JJ1=JJS(1)-1
DO 37 J=3,JJ1
DTR(I,J)=(T(I,J-2)-8.*T(I,J-1)+8.*T(I,J+1)-
+ T(I,J+2))/DR(1)/12.
DTR2(I,J)=(-T(I,J-2)+16.*T(I,J-1)-30.*T(I,J)+16.*T(I,J+1)
+ -T(I,J+2))/DR(1)**2/12.
37 CONTINUE
DTR(I,JJ1+1)=(T(I,JJ1-1)-6.*T(I,JJ1)+3.*T(I,JJ1+1)+2.*
+ T(I,JJ1+2))/DR(1)/6.
DTR2(I,JJ1+1)=(T(I,JJ1)-2.*T(I,JJ1+1)+T(I,JJ1+2))/DR(1)**2
IF (JJS(1).EQ.JSUM(IK)) GOTO 70
JJ=JJS(1)+1
DTR(I,JJ)=(DR(1)**2*T(I,JJ+1)-(DR(1)**2-DR(2)**2)*T(I,JJ)
+ -DR(2)**2*T(I,JJ-1))/( (DR(1)+DR(2))*DR(1)*DR(2))
DTR2(I,JJ)=2.*(DR(1)*T(I,JJ+1)-(DR(1)+DR(2))*T(I,JJ)+DR(2)*
+ T(I,JJ-1))/( (DR(1)+DR(2))*DR(1)*DR(2))
JSX=1
DO 39 JK=2,JR
JSX=JSX+JJS(JK-1)
JP=JSX+1
DTR(I,JP)=(-2.*T(I,JP-1)-3.*T(I,JP)+6.*T(I,JP+1)-T(I,JP+2))
+ /DR(JK)/6.
DTR2(I,JP)=(T(I,JP+1)-2.*T(I,JP)+T(I,JP-1))/DR(JK)**2
JI=JP+1
JL=JI+JJS(JK)-4
DO 38 J=JI,JL
DTR(I,J)=(T(I,J-2)-8.*T(I,J-1)+8.*T(I,J+1)-
+ T(I,J+2))/DR(JK)/12.
DTR2(I,J)=(-T(I,J-2)+16.*T(I,J-1)-30.*T(I,J)+16.*T(I,J+1)
+ -T(I,J+2))/(12.*DR(JK)**2)
38 CONTINUE
JPP=JL+1
DTR(I,JPP)=(T(I,JPP-2)-6.*T(I,JPP-1)+3.*T(I,JPP)+2.*
+ T(I,JPP+1))/DR(JK)/6.
DTR2(I,JPP)=(T(I,JPP-1)-2.*T(I,JPP)+T(I,JPP+1))/DR(JK)**2
IF(JK.EQ.JR) GOTO 70
IF( IK.EQ.2 ) GOTO 70
JPL=JPP+1
JZ=JK+1
DTR(I,JPL)=(DR(JK)**2*T(I,JPL+1)-(DR(JK)**2-
+ DR(JZ)**2)*T(I,JPL)
+ -DR(JZ)**2*T(I,JPL-1))/(DR(JK)*DR(JZ)*(DR(JK)+DR(JZ)))
DTR2(I,JPL)=2.*(T(I,JPL-1)*DR(JZ)-(DR(JK)+DR(JZ))*T(I,JPL)+
+ DR(JK)*T(I,JPL+1))/(DR(JK)*DR(JZ)*(DR(JK)+DR(JZ)))
39 CONTINUE
70 JLT=JSUM(IK)-1
DTR(I,JLT+2)=-QR(I,JLT+2)
DTR2(I,JLT+2)=(-85.*T(I,JLT+2)+108.*T(I,JLT+1)-27.*T(I,JLT)+
+ 4.*T(I,JLT-1))/(18.*DR(JR)**2)+11.*QR(I,JLT+2)/DR(JR)/3.

```

```

34      CONTINUE
        IF(IK.EQ.N) GOTO 40
        IUN=IK+1
        IFT=IFT+LLS(IK)
        ILA=ILA+LLS(IUN)
40      CONTINUE
        RETURN
        END
C*****
C* PODPROGRAM ZA ODREDJIVANJE DT/DZ I D2T/DZ2
C* METODOM KONACNIH RAZLIKA*
C*****

        SUBROUTINE AKSSUB (T,DZ,DTZ,DTZ2,QZ,LLS)
        DIMENSION T(30,20),DTZ(30,20),DTZ2(30,20),DZ(10),QZ(30,20)
        DIMENSION LLS(10)
        COMMON JSUM(10),N,NKO,ISUM,LL1,M,SIG,TS
        IS=0
        DO 50 IK=1,N
        JSU=JSUM(IK)+1
        II=IS+1
        IS=IS+LLS(IK)
        DO 99 J=1,JSU
        IF(II.NE.1) GOTO 43
        QZ(1,J)=0
        DTZ(1,J)=-QZ(1,J)
        DTZ2(1,J)=(-85.*T(1,J)+108.*T(2,J)-27.*T(3,J)+4.*T(4,J))
+ / (18.*DZ(1)**2.)
45      I2=II+1
        DTZ(I2,J)=(-2.*T(I2-1,J)-3.*T(I2,J)+6.*T(I2+1,J)-
+ T(I2+2,J))/DZ(IK)/6.
        DTZ2(I2,J)=(T(I2+1,J)-2.*T(I2,J)+T(I2-1,J))/DZ(IK)**2
        INT=II+2
        IS2=IS-2
        DO 41 I=INT,IS2
        DTZ(I,J)=(T(I-2,J)-8.*T(I-1,J)+8.*T(I+1,J)-
+ T(I+2,J))/DZ(IK)/12.
        DTZ2(I,J)=(-T(I-2,J)+16.*T(I-1,J)-30.*T(I,J)+16.*T(I+1,J)
+ -T(I+2,J))/DZ(IK)**2/12.
41      CONTINUE
        III=IS2+1
        DTZ(III,J)=(T(III-2,J)-6.*T(III-1,J)+3.*T(III,J)+
+ 2.*T(III+1,J))/DZ(IK)/6.
        DTZ2(III,J)=(T(III+1,J)-2.*T(III,J)+T(III-1,J))/(DZ(IK)**2)
        IF(IK.EQ.N) GOTO 42
        JSUR=JSUM(IK+1)+1
        IF(J.GT.JSUR) GOTO 42
        DTZ(IS,J)=(T(IS+1,J)*DZ(IK)**2-T(IS,J)*(DZ(IK)**2-
+ DZ(IK+1)**2)
+ -T(IS-1,J)*DZ(IK+1)**2)/(DZ(IK)*DZ(IK+1)*(DZ(IK)+DZ(IK+1)))
        DTZ2(IS,J)=2.*(T(IS-1,J)*DZ(IK+1)-T(IS,J)*(DZ(IK+1)+DZ(IK))
+ +T(IS+1,J)*DZ(IK))/(DZ(IK)*DZ(IK+1)*(DZ(IK)+DZ(IK+1)))
        GOTO 99
42      DTZ(IS,J)=-QZ(IS,J)
        DTZ2(IS,J)=(-85.*T(IS,J)+108.*T(IS-1,J)-27.*T(IS-2,J)+
+ 4.*T(IS-3,J))/DZ(IK)**2/18.-11.*QZ(IS,J)/DZ(IK)/3.
        GOTO 99
43      DTZ(II,J)=(-2.*T(II-1,J)-3.*T(II,J)+6.*T(II+1,J)-
+ T(II+2,J))/DZ(IK)/6.
        DTZ2(II,J)=(T(II+1,J)-2.*T(II,J)+T(II-1,J))/DZ(IK)**2.

```

```
GOTO 45
99  CONTINUE
50  CONTINUE
    RETURN
    END
```