

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу

Катарина Д. Несторовић

**Дисперзија ударног таласа у контакту са
подлогом са и без експлозије
Мастер рад**

Крагујевац, 2020.

Факултет инжењерских наука Универзитета у Крагујевцу



Назив студијског програма: Индустијско инжењерство

Ниво студија: Мастер студије

Модул: Пословно информациони системи

Предмет: Индустијски рачунарски системи

Број индекса: 400 - 2019

Катарина Д. Несторовић

**Дисперзија ударног таласа у контакту са
подлогом са и без експлозије
Мастер рад**

Комисија за преглед и одбрану:

1. др Милан Матијевић, ред. проф. - ментор

2. _____

3. _____

Датум одбране: _____

Оцена: _____

У оквиру овог мастер рада кандидат треба да

прикаже простирање ударног таласа који је изазван површинском, подземном и подводном експлозијом пројектила. Потребно је да се изврши анализа ширења сеизмичког таласа у зависности од врсте и влажности земљишта, као и од врсте вегетације на разматраном земљишту. Такође је потребно анализирати интензитет и правац ударног таласа у контакту са подлогом у случају експлозије и у случају када нема експлозије. Приказати анализу приликом удара пројектила у тло при различитим падним угловима. Детаљно објаснити деловање ударног таласа, формирање кратера и камуфлета као и повреде које настају код човека приликом дејства ударног таласа. Одредити математичке параметре ударног таласа и објаснити сеизмичке компоненте ударног таласа у случају подземних, површинских и подводних експлозија.

Препоручена литература:

- [1] Балистика на циљу, П.Елек, Машински факултет Универзитета у Београду, 2018.
- [2] Физика експлозивних процеса, Handout са предавања, С. Јарамаз, Машински факултет Универзитета у Београду, 2016.
- [3] Explosion – generated short period surface wave dispersion and noise studies along linear seismic arrays in southern Sweden, Kjell Astrom and Carl Erik Lund, Department of Geophysics, University of Uppsala, 1992.

Крагујевац, 15.03.2020. године

Ментор:
др Милан Матијевић, ред. проф.

Садржај:

1 УВОД.....	1
2 ОПШТЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЕКСПЛОЗИВНИХ МАТЕРИЈА	2
2.1 Осетљивост на удар.....	5
2.2 Осетљивост при напрезању на притисак	5
2.3 Осетљивост на ударне таласе	6
3 ДЕТОНАЦИЈА	7
3.1 Основни појмови о ударном таласу.....	7
3.2 Хидродинамичка теорија детонације	8
3.3 Деловање експлозије.....	9
3.4 Контактна детонација	10
4 ПОНАШАЊЕ МАТЕРИЈАЛА ПРИ ДИНАМИЧКОМ ОПТЕРЕЋЕЊУ	12
4.1 Пластично деформисање материјала.....	12
4.2 Талас напона	12
4.3 Ударни таласи у чврстом тлу	14
5 МЕХАНИКА ПЕНЕТРАЦИЈЕ.....	16
5.1 Типови пенетрационог процеса	18
5.2 Пробијање танких металних плоча.....	22
5.3 Пробијање алуминијумских препрека.....	23
5.4 Пробијање бетонских препрека	24
5.5 Пробијање тла и дубина продирања у тло	25
5.6 Пробијање керамичких препрека.....	25
5.7 Пробијање препрека од композитних материјала.....	26
6 РУШЕЋЕ ДЕЈСТВО	27

6.1 Зона блиског дејства	28
6.2 Простирање ударног таласа у ваздуху	29
6.3 Одређивање параметара ударног таласа	31
6.3.1 Friedlanderova једначина	34
6.4 Интеракција ударног таласа са препреком	36
6.5 Деловање ударног таласа.....	39
6.5.1 Систем са једним степеном слободе	39
6.5.2 Режији оптерећења.....	40
6.5.3 Криве једнаких оштећења.....	42
6.5.4 Деловање спољашње експлозије на структуру.....	43
6.5.5 Деловање ударног таласа на човека.....	44
6.6 Рушеће дејство при детонацији у тлу.....	44
6.6.1 Формирање кратера	44
6.6.2 Сеизмичке компоненте површинских експлозија	47
6.6.3 Сеизмичке компонентне подземних експлозија.....	50
6.6.4 Одређивање параметара ударног таласа	53
6.7 Подводне експлозије.....	54
6.7.1 Сеизмичке компоненте подводних експлозија.....	56
7 ЗАКЉУЧАК.....	59
8 ЛИТЕРАТУРА.....	60

Садржај слика:

Слика 1: Крива осетљивости на удар	5
Слика 2: Ударне адијабате код детонационог таласа	8
Слика 3: Структура детонационог таласа у дијаграму $p - v$	9
Слика 4: Четири зоне и њихови радијуси	10
Слика 5: Експлозив у контакту са препреком	10
Слика 6: Пад притиска на прегради при одбијању детонационог таласа.....	11
Слика 7: Сеизмичка ефикасност контактне експлозије и удар на Земљину кору	11
Слика 8: Талас напона у плочи изазван контактном детонацијом	12
Слика 9: Упрошћен модел оптерећења материјала: а) сабијање, б) затезање	13
Слика 10: Рефлексија и трансмисија таласа напона на граници две средине.....	13
Слика 11: Основни параметри равног ударног таласа у чврстом телу.....	14
Слика 12: Hugoniotova једначина и Rayleighjeva линија у $p-v$ дијаграму	15
Слика 13: Hugoniotova једначина у $p-u$ дијаграму	16
Слика 14: Дијаграм у $t-x$ координатном систему за проблем судара две плоче	16
Слика 15: Кретање таласа у плочи при појави одваљивања.....	19
Слика 16: Таласи напрезања у еластичној плочи изазвани контактном детонацијом	20
Слика 17: Пројектил на принципу Хопкинсовог ефекта	20
Слика 18: Основни типови пенетрационих процеса	21
Слика 19: Вероватноћа пробијања препреке у зависности од ударне брзине пенетратора.....	22
Слика 20: Трофазни модел пенетрације	23
Слика 21: Типичне зависности брзине, померања и силе отпора	24
Слика 22: Рушеће дејство и други видови примене експлозивних процеса у БГ	28
Слика 23: Простирање ударног таласа за неколико временских тренутака	30

Слика 24: Промена притиска са временом на одређеном константном растојању	30
Слика 25: Измерене вредности притиска и импулса притиска при детонацији 1 kg пентрита на растојању од 3m од центра експлозије.....	31
Слика 26: Утицај повећања радијуса рушећег дејства на промену масе експлозива и импулс притиска.....	32
Слика 27: Натпритисак у функцији времена на раздаљини од 523.5m од центра површинског праска	35
Слика 28: Хидростатички натпритисак у функцији времена настао експлозијом 1kg ТНТ	36
Слика 29: Различити видови рефлексије ударног таласа.....	38
Слика 30: Вредности натпритисака на тлу при нуклеарној експлозији од 1kt у зависности од висине активирања бомбе и удаљености од нулте тачке.....	38
Слика 31: Структура под дејством ударног таласа: а) модел са једним степеном слободе, б) промена оптерећења са временом	39
Слика 32: Време трајања позитивне фазе оптерећења и период сопствених осцилација структуре.....	41
Слика 33: Зависност динамичког фактора оптерећења од параметра ωT	41
Слика 34: Крива једнаких померања у Р-І дијаграму.....	42
Слика 35: Кратер са означеним параметрима	45
Слика 36: Зависност коефицијента С од параметра $\sqrt[3]{\frac{m_E}{K}} / h$	46
Слика 37: Дијаграм лома стене у затвореној експлозији	46
Слика 38: Конфигурација регије лома при удару	47
Слика 39: Илустровани шематски дијаграм еволуције акустичног оптерећења на површини као функција удаљености од нулте земљине површине	48
Слика 40: Конфигурација регије лома у контактної експлозији	48
Слика 41: Сеизмичке компоненте површинске експлозије изазване експлозивним изворима из прве групе.....	49
Слика 42: Сеизмичке компоненте површинске експлозије изазване експлозивним изворима из друге групе.....	50

Слика 43: а) апроксимативни импулс који доводи до унутрашње теоријске границе, б) формирање површинског таласа у еластичном медијуму	51
Слика 44: Варијација брзина у односу на време	51
Слика 45: Вертикалне сеизмичке компоненте земљишта приликом подземне експлозије.....	53
Слика 46: Зависност притиска од времена при подводној експлозији	55
Слика 47: Вертикалне осцилације земљишта које су проузроковане експлозијом 52kg експлозива на различитим удаљеностима од епицентра	57
Слика 48: Акустични сигнал приликом експлозије 52kg експлозива	58

Садржај табела:

Табела 1: Запреминска концетрација за неке експлозивне и запаљиве материје	2
Табела 2: Максималне брзине детонације за најчешће примењене експлозиве	3
Табела 3: Рачунске вредности температура експлозија за неке ЕМ	4
Табела 4: Вредности коефицијента К у зависности од врсте тла	45

Dispersion of the missile blast wave in contact with the substrate with and without explosion

Abstract:

This paper deals with the propagation of the blast wave caused by surface, underground and underwater projectile explosion. Seismic wave propagation analysis was performed depending on the type and humidity of the soil, as well as the type of vegetation on the considered soil. The intensity and direction of an impact of the projectile in contact with the non-explosive surface at various incident angles, were analyzed separately. The general characteristics of explosive substances as well as all terms related to explosion and detonation are explained. Mathematical conditions for breaking through obstacles of different materials and different thicknesses within the penetration mechanics are presented. The action of the blast wave, the way in which craters and camouflages are formed, as well as the blast injuries that occur in humans during the action of the blast wave are explained. Mathematical parameters of the blast wave, as well as seismic components of the wave during underwater, underground and surface explosions were determined. The obtained results will be used to select commercial seismic sensors in order to measure the intensity and direction of the earthquake - explosion propagation.

Key words: blast wave, explosion, ruinous effect, missile, dispersion, detonation

Дисперзија ударног таласа пројектила у контакту са подлогом са и без експлозије

Резиме:

У раду је приказано простирање ударног таласа изазваног површинском, подземном и подводном експлозијом пројектила. Анализа ширења сеизмичког таласа извршена је у зависности од врсте и влажности земљишта, као и од врсте вегетације на разматраном земљишту. Анализиран је интензитет и правац ударног таласа пројектила у контакту са подлогом са и без експлозије, при различитим падним угловима. Објашњене су опште карактеристике експлозивних материја као и сви појмови везани за експлозију и детонацију. Приказани су математички услови за пробијање препрека од различитих материјала и различите дебљине у оквиру механике пенетрације. Објашњено је деловање ударног таласа, начин на који се формирају кратери и камуфлети, као и бласт повреде које настају код човека приликом дејства ударног таласа. Одређени су математички параметри ударног таласа, као и сеизмичке компоненте таласа приликом подводних, површинских и подземних експлозија. Добијени резултати ће бити искоришћени за одабир комерцијалних сеизмичких сензора у циљу мерења интензитета и правца простирања потреса – експлозије.

Кључне речи: ударни талас, експлозија, рушеће дејство, пројектил, дисперзија, детонација

1 УВОД

У овом раду је приказано простирање ударног таласа изазваног површинском, подземном и подводном експлозијом пројектила. Анализа ширења сеизмичког таласа извршена је у зависности од врсте и влажности земљишта. Анализиран је интензитет и правац ударног таласа пројектила у контакту са подлогом са експлозијом и без експлозије при различитим падним угловима. Објашњене су опште карактеристике експлозивних материја као и сви појмови везани за експлозију и детонацију. Приказани су математички услови за пробијање препрека од различитих материјала и различите дебљине у оквиру механике пенетрације. Објашњено је деловање ударног таласа, начин на који се формирају кратери и камуфлети, као и бласт повреде које настају код човека приликом дејства ударног таласа. Одређени су математички параметри ударног таласа, као и сеизмичке компоненте таласа приликом подземних, подводних и површинских експлозија.

Ударни талас је у основи шок потпомогнут касном егзотермном реакцијом. То укључује талас који путује кроз високо запаљив или хемијски нестабилан медијум, као што је мешавина кисеоника и метана или висок експлозив. Хемијска реакција медијума настаје након ударног таласа, а хемијска енергија реакције води талас напред. Ударни талас следи мало другачија правила од обичног таласа, јер га покреће хемијска реакција која се дешава из таласа. У најједноставнијој теорији за детонације, неподржани, самоподручни детонациони талас одвија се брзином *Chapman-Jouguet* протока. Стање *Chapman-Jouguet* задржава се приближно у ударним таласима у високим експлозивима. Детонација се шири брзином којом реактивни гасови тек достижу звучну брзину (у оквиру водећег ударног таласа) како реакција престаје. Детонација ће такође проузроковати да се талас шири у околни ваздух због натпритиска изазваног експлозијом. [13]

Кроз овај рад су приказани експерименти које су изводили светски научници у циљу мерења сеизмичких компоненти подземних, подводних и површинских експлозија. У већини случајева од експлозива је коришћен ТНТ који је активиран у води, на земљи или у земљи, зависно од сврхе и врсте експеримента. Када ударни талас створи експлозив попут ТНТ-а (који има брзину детонације од 6.900 m/s), талас ће се увек кретати надзвучном брзином од своје тачке настанка. Ударни таласи који су настали деловањем експлозива су снимани посебном опремом која је бележила фреквенције и дисперзију насталих таласа. За мерење параметара ове врсте се углавном користе аналогни системи са више канала.

У циљу заштите подземних структура и радова од штетних ефеката подземних експлозија, развијена је метода којом се одређују сеизмичке карактеристике подземних експлозија. Испитано је понашање тела услед дејства импулсних ефеката коришћењем нумеричких метода, које представљају даљи развој методе коначних разлика, базираних на замени диференцијалних једначина. [4]

Приликом деловања ударног таласа стварају се три сеизмичке компоненте осцилаторног кретања земљишта: вертикална и две хоризонталне. [8] Битна карактеристика ударног таласа је и акустични сигнал. Поменуте сеизмичке компоненте и акустични сигнали су приказани у виду дијаграма чији изглед зависи од количине употребљеног експлозива и удаљености измерене компоненте од епицентра експлозије.

Дејство ударног таласа највише зависи од врсте пројектила и експлозивног пуњења који изазивају талас.

Са аспекта терминалне балистике најзначајнија подела пројектила је према начину дејства на циљ, где имамо:

- пробојно дејство (пенетрација, односно перфорација),
- рушеће дејство натпритиска ударног таласа (бласт ефекат или фугасно дејство). [1]

Добијени резултати ће бити искоришћени за одабир комерцијалних сеизмичких сензора у циљу мерења интензитета и правца простирања потреса – експлозије.

2 ОПШТЕ КАРАКТЕРИСТИКЕ ЕКСПЛОЗИВНИХ МАТЕРИЈА

Експлозија представља процес веома брзог физичког или хемијског преображаја система праћен прелазом његове потенцијалне енергије у механички рад. Рад који се обавља при експлозији условљен је брзим ширењем гасова или пара, без обзира да ли они постоје пре експлозије или су створени у току експлозије.

Основно спољно обележје сваке експлозије је нагли скок притиска у средини у којој се експлозија догађа. На овој особини засновано је рушеће дејство експлозије.

Експлозија може бити изазвана појавама физичког, хемијског или нуклеарног карактера.

Код физичких експлозија (изазваних физичким појавама) долази до тренутног прелаза материје из једног физичког стања у друго.

Појаве које изазивају физичку експлозију су:

- експлозија прегрејаног парног котла,
- удар метеора,
- експлозије при снажним електричним пражњењима,
- изненадни прелазак метала у пару.

Нуклеарне експлозије последица су ланчаних нуклеарних реакција, које се могу одвијати фисијом (цепањем) или фузијом (спајањем) атомских језгара, уз ослобађање велике количине енергије у различитим појавним облицима.

Да би хемијски систем по карактеру био експлозиван мора да задовољи три основна услова:

- да је егзотерман (издвајање топлоте),
- да се одвија великом брзином,
- да ствара гасове. [2]

У табели 1 дата је запреминска концентрација енергије за неке експлозивне и запаљиве материје.

Табела 1: Запреминска концентрација за неке експлозивне и запаљиве материје [2]

Експлозивне ЕМ и запаљиве смеше	Запреминска концентрација енергије (kJ/dm^3)
Нитроцелулоза (13.3 % N_2)	5650.
Нитроглицерин	9970.
Смеша угљеника и O_2	17.2
Смеша бензолових пара и O_2	18.4
Смеша водоника и O_2	7.1

О брзини процеса експлозивног разлагања може се судити на основу вредности линеарне брзине распрострањања експлозије у експлозивном пуњењу. Максималне брзине распрострањања експлозије у савременим експлозивним материјама крећу се од 1000 до 9000 m/s. Ова брзина распрострањања експлозије назива се детонациона брзина. [2]

У табели 2 дате су максималне брзине детонације за неке експлозиве најчешће примењене у војној техници.

Табела 2: Максималне брзине детонације за најчешће примењене експлозиве [2]

Експлозив	Брзина детонације D (m/s)
Хексоген	8300
Пентрит	8100
Нитроглицерин	8000
Тетрил	7700
Пикринска киселина	7200
Нитроцелулоза	6950
Тротил	6900

По карактеру и брзини распрострањања сви познати експлозивни процеси деле се на следеће основне видове: сагоревање, експлозија и детонација.

Процес сагоревања експлозивне материје одвија се најчешће променљивом брзином која може да достигне вредности од неколико m/s. Брзина сагоревања битно зависи од спољњег притиска и знатно расте са његовим порастом.

Експлозија је процес код кога брзина експлозивног разлагања има вредност неколико стотина, па чак и неколико хиљада m/s и мало зависи од спољних услова. Карактеристична обележја експлозије су и нагли скок притиска на месту експлозије и променљива брзина распрострањања процеса.

Детонација се по својој природи не разликује од експлозије, већ представља њену стационарну форму. Детонација је експлозивни процес који се одвија константном брзином, максималном за дату експлозивну материју и прелази брзину звука у датој експлозивној материји.

Поделу експлозивних материја можемо извршити према више критеријума.

Основни критеријум поделе ЕМ је према агрегатном стању, где разликујемо:

- гасовите ЕМ,
- течне ЕМ,
- чврсте ЕМ.

Експлозивне материје се према намени деле на:

- иницирајуће ЕМ (примарни експлозиви) – примењују се као средства за изазивање експлозивних процеса. Најважнији представници су: живин фулминат, азид олова, стифнат олова, ацетилениди, тетразен, итд.
- бризантне ЕМ (бризантни експлозиви) – детонирају под дејством значајног спољњег утицаја, најчешће уз помоћ иницијалних експлозива. Најважнији представници су: нитрати, нитроједињења, хексоген, нитрогвандин, итд.

- барути – основни облик преображаја барута је сагоревање. Деле се у две групе: барути механичке смеше (композитни барути и црни барут) и барути колоидног типа (малодимни барути – нитроцелулозни, нитроглицерински, дигликолски и нитрогвандински).
- пиротехничке смеше – механичке смеше неорганских оксиданата са органским и металним горивима и везујућим адитивима.

Температура експлозије назива се максимална температура до које се загреју продукти експлозивне реакције. Одређује се рачунским путем због велике сложености поступака њеног експерименталног одређивања. Температура експлозије се рачуна преко формуле:

$$T_e = \frac{Q_v}{\sum v_i C_{v,i}} \quad (2.1)$$

где су:

Q_v – укупни топлотни ефекат,

v_i – број молекула i – тог продукта у продуктима сагоревања ЕМ,

$C_{v,i}$ – средња специфична топлота. [2]

У табели 3 су приказане рачунске вредности температура експлозије за неке ЕМ.

Табела 3: Рачунске вредности температура експлозија за неке ЕМ [2]

Експлозивна материја	Температура експлозије (К)
Тринитротолуол (ТНТ)	3370
Хексоген	3650
Нитроглицерин	3470
Тетрил	3970
Пентрит	4500
Оловоазид	3700
Оловотрирезорцинат	2700

Експлозивни процес не може отпочети сам од себе – неопходно је дејство неке спољне силе под чијим утицајем настаје експлозивни процес, који се затим наставља сам од себе. Потребно је само тренутно дејство спољне силе – почетни импулс.

Осетљивост ЕМ је њена способност за експлозивни преображај под дејством спољних утицаја. Што је почетни импулс неопходан за почетак експлозивног преображаја већи, ЕМ је мање осетљива и обрнуто.

За почетни импул могу се користити различити облици енергије, а најпознатији су:

- топлотна енергија (загревање, пламен, искра,...),
- механички рад (удар, трење, убод, потрес,...),
- енергија иницијалне ЕМ,
- ударни талас. [2]

2.1 Осетљивост на удар

Иницирање експлозије адијабатским сабијањем гасовитих укључака ЕМ започиње стварањем вруће тачке, коју представља сам мехурић. Механизам трансформације енергије удара састоји се у загревању мехурића адијабатском компресијом. Ако претпоставимо да је у мехурићу идеалан гас, вредност постигнуте температуре унутар мехурића биће функција степена компресије:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}, \quad (2.1.1)$$

где су:

T_1 – почетна температура у мехурићу,

T_2 – коначна температура у мехурићу,

p_1 – почетни притисак у мехурићу,

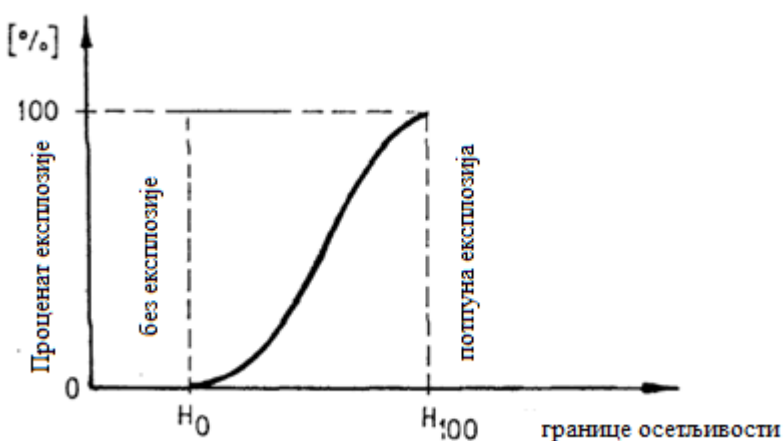
p_2 – коначни притисак у мехурићу,

κ – однос специфичних топлота при константном притиску и константној запремини.

Осетљивост на удар експлозивних материја карактерише минимална енергија удара при којој долази до сигурног активирања, односно максимална енергија удара при којој сигурно не долази до активирања ЕМ.

Експериментално одређивање осетљивости на удар иницијалних ЕМ обухвата одређивање горње (H_{100}) и доње (H_0) границе осетљивости, односно услове сигурног дејства иницијалних средстава и услове безбедног рада са тим средствима. [2]

На слици 1 је приказана крива осетљивости на удар.



Слика 1: Крива осетљивости на удар [2]

2.2 Осетљивост при напрезању на притисак

Са становишта примене ЕМ осетљивост при напрезању на притисак је од великог практичног значаја када се ради о експлозивима који се употребљавају као експлозивно пуњење артиљеријских и других врста пројектила. У цеви артиљеријских оруђа под дејством барутних гасова или на активном делу путање под дејством реактивне силе ракетног мотора

пројектил се креће променљиво убрзаним кретањем. Услед овог кретања експлозивно пуњење је изложено дејству инерцијалне силе. Инерцијална сила у експлозивном пуњењу изазива напрезање на притисак које у одређеном моменту, када пређе једну вредност, може постати иницијални импулс. Резултат оваквог догађаја јесте превремена експлозија – дејство пројектила у цеви оруђа или на активном делу путање.

Напрезање које се појављује у експлозивном пуњењу може се дефинисати уз следеће претпоставке:

- да се искључи могућност линеарног померања експлозивног пуњења при опаљењу за време убрзања, тј. да пуњење чврсто належе на дно пројектила,
- да густина и структура ЕМ буде иста у целој маси пуњења, па је и напрезање у било којој тачки одређеног пресека исто.

Напрезање на притисак дато је следећом једначином:

$$\sigma_p = \frac{m_i \frac{d^2 x}{dt^2}}{A_{i-i}}, \quad (2.2.1)$$

где су:

m_i – маса експлозива изнад пресека $i-i$,

$\frac{d^2 x}{dt^2}$ - убрзање пројектила у посматраном тренутку,

A_{i-i} – површина експлозива у пресеку $i-i$.

Напрезање дато претходном једначином достиже максималну вредност при највећој вредности убрзања и у најнижем пресеку у експлозиву пројектила. Максимално напрезање мора бити мање од дозвољеног напрезања на притисак, да би се избегла могућност превремене експлозије. [2]

2.3 Осетљивост на ударне таласе

Детонација експлозива најчешће се изазива деловањем ударног таласа који је створен у пуњењу. Најчешће је створен детонацијом иницијалног експлозива или неког другог бризантног експлозива. Експлозивно пуњење које својим експлозивним претварањем ствара ударни талас који се шири и који може да послужи као почетни импулс за иницијацију неког другог експлозивног пуњења, најчешће се назива активно пуњење, док се за ово друго које прима импулс ударног таласа назива пасивно пуњење.

Притисак у иницирајућем ударном таласу мора бити изнад неког критичног притиска. Колика ће бити амплитуда иницирајућег ударног таласа у тренутку судара са пасивним пуњењем ЕМ зависи од: количине, врсте и облика активног пуњења и дисипације енергије ударног таласа у току ширења.

Што је већа количина активног пуњења, то је већа амплитуда ударног таласа. За различите средине ова зависност се одређује експериментално.

Почетни геометријски облик експлозивног пуњења утиче на ширину и правац зоне потискивања ударног таласа. Тај утицај посебно се уочава при мањим пуњењима и на мањим удаљеностима.

Величина укупне дисипативне енергије различитих средина зависи од густине средине. Ако је изнад активног и пасивног пуњења метална препрека може доћи до разарања преграде и активирања пасивног пуњења крхотинама. [2]

3 ДЕТОНАЦИЈА

Преображај експлозивних материја одвија се са два суштински различита механизма: сагоревањем и експлозијом. Простирање процеса сагоревања одвија се према законима простирања топлоте и то брзином која је знатно мања од брзине звука у још неизреагованој ЕМ.

Експлозију карактерише суштински различит механизам преображаја, где је простирање процеса кроз ЕМ везано за простирање ударног таласа. Брзина простирања је већа од брзине звука у неизреагованој ЕМ. При овоме долази до следећих појава: наредни слој ЕМ изложен је снажном удару продуката реакције претходног слоја, који имају веома висок притисак. Брзо и снажно сабијање у наредном слоју ЕМ доводи до загревања до температуре при којој се реакција распадања одвија великом брзином. Топлота која се у току ове реакције ослобађа надокнађује енергију ударном таласу, који сабија следећи слој, чиме је обезбеђена стационарност процеса или пораст брзине простирања. Брзина простирања оваквог процеса одређена је брзином ударног таласа у датој ЕМ и износи неколико хиљада m/s . [2]

3.1 Основни појмови о ударном таласу

Код ударног таласа долази до скоковите промене p , T и ρ , а при пролазу фронта ударног таласа долази до струјања медија које је утолико веће уколико је интензитет таласа већи. У фази компресије струјање се одвија у правцу кретања ударног таласа, а у фази разређивања долази до слабљења струјања, па чак и кретања у супротном смеру. Брзина ударног таласа је увек већа од брзине звука. Уколико ударни талас није енергетски подржаван, он постепено слаби и претвара се у звучни талас.

Ударни талас је квантитативно описан са 5 величина:

- брзином простирања ударног таласа – D ,
- брзином кретања гаса – V ,
- притиском – p ,
- температуром – T ,
- густином – ρ .

Користећи законе одржања масе, импулса и енергије и једначину стања можемо повезати претходне величине. [2]

Закон одржања масе има следећи облик: [2]

$$\rho_0 D = \rho (D - V), \quad (3.1.1)$$

Закон одржања количине кретања има следећи облик: [2]

$$\rho_0 DV = p - p_0, \quad (3.1.2)$$

Закон одржања енергије има следећи облик: [2]

$$\rho_0 DV \left(E - E_0 + \frac{V^2}{2} \right) = pV \quad (3.1.3)$$

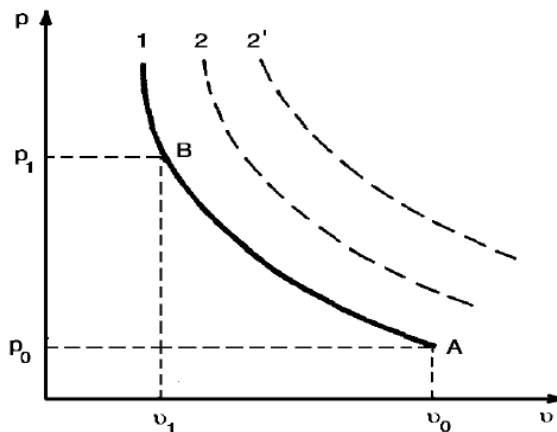
3.2 Хидродинамичка теорија детонације

Према хидродинамичкој теорији детонација се простире по експлозивној материји као резултат проласка ударног таласа, који доводи до експлозивног преображаја сваког слоја материје кроз који прође. Брзина детонације је брзина простирања ударног таласа по ЕМ при којој је скок притиска довољно велики да може изазвати експлозивни процес у захваћеном слоју материје.

Детонација се простире кроз експлозивно пуњење константном брзином захваљујући томе што се губитак енергије ударног таласа непрестано надокнађује енергијом хемијског преображаја нових честица материје.

Брзина ударног таласа зависи само од природе и својстава експлозивне средине, па према томе и брзина детонације не зависи од интензитета почетног импулса, ако је он довољан да побуди стабилну рекацију. [2]

На слици 2 је приказана крива ударне адијабате за детонациони талас.

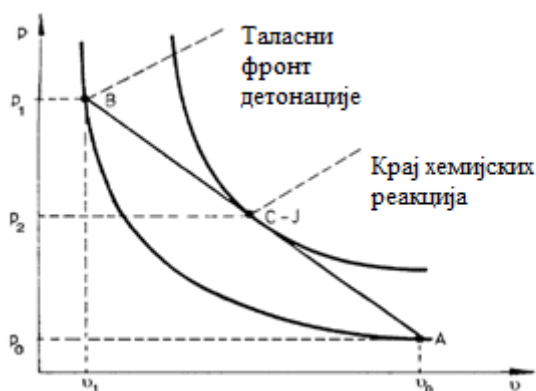


Слика 2: Ударне адијабате код детонационог таласа [2]

Полазно стање ЕМ карактерише се тачком А. Услед деловања ударног таласа, стање полазне материје прелази у стање В. Код снажнијег ударног таласа брзина промене стања је врло велика, па се може сматрати да се прелаз из стања А у стање В врши скоро тренутно.

Међутим, упоредо са одвијањем реакција мењају се и својства материје и издваја се одређена количина топлоте. При томе се стање система не може описати само адијабатом 1 полазне материје већ и неком другом адијабатом продуката детонације (адијабате 2 и 2'). Како се у систему ослобађа топлота, адијабата продуката детонације мора да лежи изнад адијабате полазне ЕМ. Промена стања при прелазу са адијабате 1 на адијабату 2 је строго одређена. [2]

Структура детонационог таласа је приказана на слици 3.



Слика 3: Структура детонационог таласа у дијаграму $p - v$ [2]

Тачка $C-J$ представља крај ослобађања топлоте, односно завршетак хемијских реакција. Брзина детонације зависи од низа фактора:

- пречник пуњења,
- топлота експлозије,
- густина пуњења,
- почетни импулс,
- примесе,
- почетна температура,
- притисак. [2]

3.3 Деловање експлозије

Механички рад експлозије врши се на рачун потенцијалне хемијске енергије коју поседује ЕМ. Тај потенцијал прелази у топлотну енергију, а затим у механички рад, при чему долази до одређених губитака (хемијски, топлотни, губици механичког рада).

Разликују се два основна облика спољног рада експлозије: бризантно и рушеће дејство.

Бризантним дејством назива се кидање, пробијање и дробљење при експлозији средине која је у непосредном додиру са пуњењем ЕМ. Ово дејство је резултат удара продуката експлозије који се налазе под врло високим притиском и јавља се само у непосредној близини експлозивног пуњења.

Рушеће (фугасто) дејство представља облик рада експлозије који се манифестује разбијањем и одбацивањем средине у којој се јавља експлозија. Рушеће дејство је условљено ширењем продуката експлозије до релативно ниских притисака проласком ударног таласа кроз околну средину. Иза граничне зоне рушећег дејства лежи знатно већа област у којој се простиру релативно слаби ударни таласи. Иза области ударних таласа лежи област звучних таласа.

Дејство експлозије на било коју средину одређује се количином кретања саопштеног честицама средине као резултат удара продуката експлозије. Ова количина кретања једнака је импулсу силе притиска. [2]

Специфични импулс продуката детонације одређује се по једначини:

$$i = \int_0^{\tau} p dt \quad (3.3.1)$$

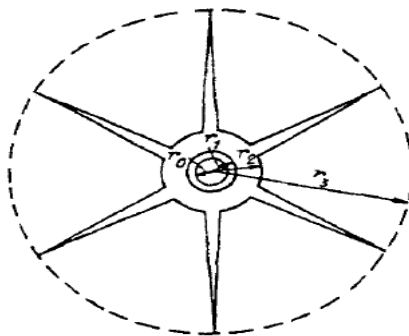
Рушеће дејство је теоријска величина пропорционална потенцијалној енергији експлозивне материје. [2]

Приликом експлозије у чврстом материјалу потребно је одвојити следеће зоне:

- зона размештаја (зона 1),
- зона удара (зона 2),
- зона формирања кратера (зона 3),
- зона еластичне деформације (зона 4). [11]

Радијус прве зоне не прелази вредност од 3 радијуса експлозивног пуњења, радијус друге зоне достиже вредност и до 10 радијуса експлозивног пуњења, док радијус треће зоне достиже вредност и до 100 радијуса експлозивног пуњења. [11]

На слици 4 су приказане четири зоне и њихови радијуси.

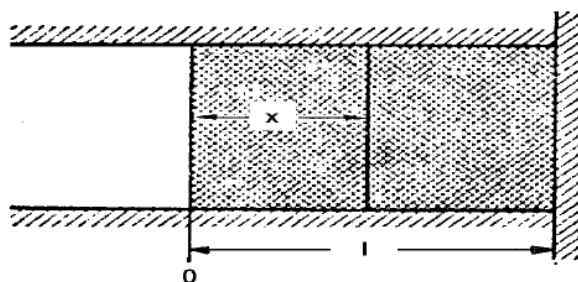


Слика 4: Четири зоне и њихови радијуси (r_0 – радијус шупљине са експлозивом, r_1 – радијус прве зоне, r_2 – радијус друге зоне и r_3 – радијус треће зоне) [11]

3.4 Контактна детонација

При одбијању детонационог таласа од препреке при контактної детонацији у општем случају део импулса експлозивног пуњења се преноси на препреку, а део се претвара у количину кретања продуката детонације. [2]

На слици 5 је приказан експлозив у контакту са препреком.



Слика 5: Експлозив у контакту са препреком [2]

Каква ће бити прерасподела импулса у конкретном случају зависи од врсте материјала и инерције препреке. Независно од карактеристика препреке укупна величина импулса експлозивног пуњења, који се преноси на препреку или продукте детонације зависи од услова ширења продуката детонације. Ако се иницирање детонације врши са једног краја, тада услови ширења продуката детонације зависе само од карактеристика облоге око експлозивног пуњења. Облоге могу бити стишљиве или нестишљиве и масивне или танке. Теоријско решење за промену притиска на деформабилној препреци при контактної детонацији и једносмерном ширењу продуката детонације има облик:

$$p = \frac{64}{27} p_D \left(\frac{I}{Dt} \right)^3, \quad (3.4.1)$$

где су:

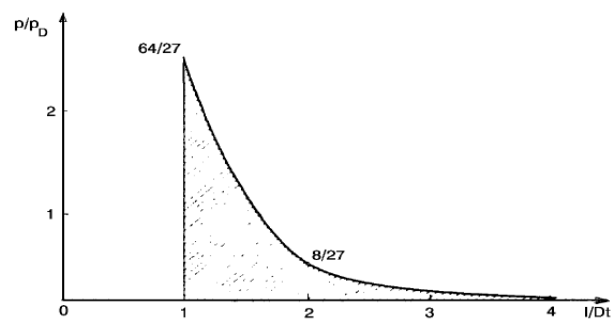
p_D - притисак у детонационом таласу,

I - дужина експлозивног пуњења у контакту са препреком,

D - детонациона брзина,

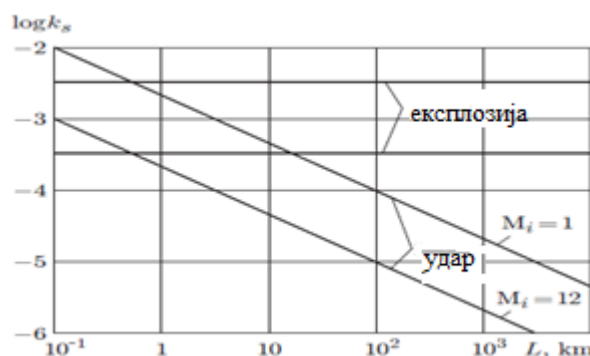
t - време од тренутка побуђивања детонације у експлозивном пуњењу. [2]

На слици 6 је приказан пад притиска на прегради при одбијању детонационог таласа.



Слика 6: Пад притиска на прегради при одбијању детонационог таласа [2]

На слици 7 је приказана сеизмичка ефикасност контактне експлозије и удар на Земљину кору. [7]



Слика 7: Сеизмичка ефикасност контактне експлозије и удар на Земљину кору за

$\sigma_s / \mu = 10^{-3}$, где је σ_s - напон смицања стене а μ - коефицијент трења [7]

4 ПОНАШАЊЕ МАТЕРИЈАЛА ПРИ ДИНАМИЧКОМ ОПТЕРЕЋЕЊУ

Карактеризација понашања материјала од којих су израђене структуре које разматрамо представља један од основних проблема при моделирању терминално балистичких процеса. При мањим вредностима оптерећења и деформација материјал се налази у зони еластичности где се примењује *Hookov* закон. Врло често је могуће занемарити еластичне деформације материјала с обзиром да се на њих троши неупоредиво мања енергија него на пластично деформисање. [1]

4.1 Пластично деформисање материјала

Први задатак представља одређивање услова течења материјала, односно дефинисање услова преласка из еластичне у пластичну зону деформисања.

До пластичног течења материјала долази када енергија промене облика достигне критичну вредност и то када је:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_y^2, \quad (4.1.1)$$

У горњем изразу σ_i су вредности главних напона, док је σ_y граница течења која се одређује експерименталним путем за сваки материјал.

Други задатак представља дефинисање конститутивне једначине материјала. Материјал се може сматрати идеално пластичним, односно таквим да за све време пластичног деформисања важи једначина 3.1.1. У реалном стању долази до ојачавања материјала које се манифестује повећањем напона течења са растом деформација. У случају једнодимензионалног стања напона ($\sigma_1 = \sigma$) закон ојачавања има општи облик:

$$\sigma = F(K_i, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, T, \dots), \quad (4.1.2)$$

при чему су:

ε и $\dot{\varepsilon}$ - релативна деформација и брзина релативне деформације,

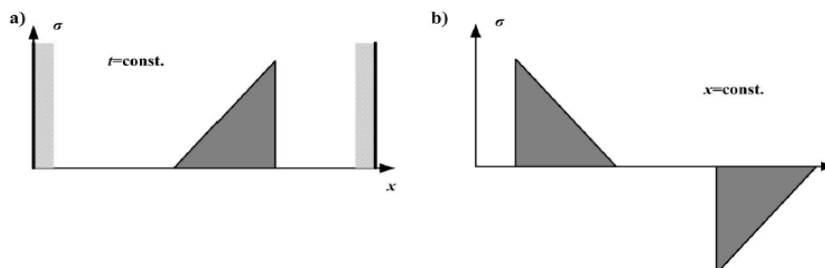
K_i - експериментално утврђени параметри који зависе од врсте материјала,

T - температура материјала. [1]

4.2 Талас напона

Поремећај о оптерећењу преноси се од тачака у којима оптерећење делује ка другим деловима структуре путем таласа напона. [1]

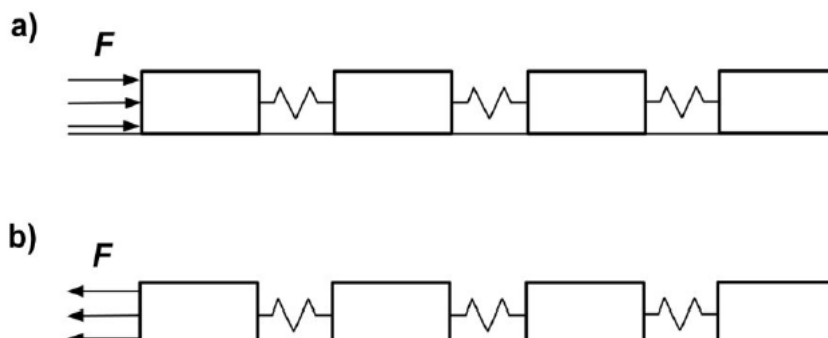
На слици 8 је приказана промена напона у целом попречном пресеку плоче у одређеном тренутку (а) и у фиксираним пресеку плоче (б).



Слика 8: Талас напона у плочи изазван контактном детонацијом [1]

Уочавамо импулсни карактер процеса оптерећења, фронт напонског таласа и одговарајући профил импулса који зависи од природе и трајања оптерећења.

На слици 9 је приказан упрошћен модел оптерећења чврстог материјала.



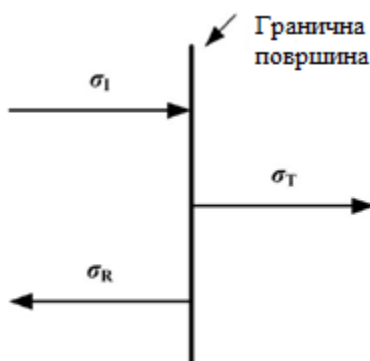
Слика 9: Упрошћен модел оптерећења материјала: а) сабијање, б) затезање [1]

Правоугаоници представљају молекуле материјала који су међусобно спојени опругама којима се моделирају међумолекулске везе. Када се на тело делује динамичком силом она помера први молекул на десно, он делује на други преко опруге и помера га, итд. На овај начин се напон преноси кроз материјал, а брзина којом поремећај путује кроз материјал назива се брзина простирања таласа c .

Молекули се такође крећу одређеном брзином која се назива материјална брзина v и која је значајно мања од брзине простирања таласа. У случају сабијања смерови материјалне брзине и брзине таласа се подударају, а у случају затезања су супротни.

Приликом преласка таласа напона из једне средине у другу долази до одбијања (рефлексije) и преноса (трансмисије) упадног таласа. [1]

На слици 10 је приказан пример раванског таласа напона који наилази на равну граничну површину између две средине.



Слика 10: Рефлексија и трансмисија таласа напона на граници две средине [1]

Упадни талас је обележен са σ_1 , рефлектовани талас са σ_R , а трансмитовани талас σ_T . Сабијање има позитиван предзнак, а затезање негативан. Претпоставка је да су густине материјала ρ и брзине таласа c познате. Математички модел упадног таласа је следећи:

$$\sigma_1 + \sigma_R = \sigma_T$$

$$\frac{\sigma_1}{\rho_1 c_1} - \frac{\sigma_R}{\rho_1 c_1} = \frac{\sigma_T}{\rho_1 c_1}$$

$$\sigma_R = \frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \sigma_1, \quad (4.2.1)$$

$$\sigma_T = \frac{2\rho_2 c_2}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \sigma_1$$

Рефлексиона и трансмисиона својства материјала зависе само од производа његове густине и брзине таласа – ρc . Овај производ се назива импеданса. [1]

4.3 Ударни таласи у чврстом тлу

Снажна оптерећења, изазвана експлозијом или ударом, могу да доведу до формирања ударног таласа у чврстом тлу. Када је оптерећење довољно велико да брзина пластично деформисаног материјала v достигне вредност брзине простирања таласа пластичног напона c_p , тада формирање ударног таласа представља одговор материјала на овакво оптерећење.

Ударни таласи у чврстим телима имају следеће карактеристике:

- иза фронта ударног таласа долази до наглог скока притиска, густине, брзине и температуре оптерећеног материјала,
- брзина простирања ударног таласа већа је од локалне брзине звука.

Вредности напона иза ударног таласа вишеструко превазилазе ниво затезне чврстоће материјала. Због тога се понашање материјала у овим условима дефинише као хидродинамичко. [1]

На слици 11 је приказан раван ударни талас који се простира брзином U .



Слика 11: Основни параметри равног ударног таласа у чврстом телу [1]

Примена закона о одржању масе , закона о одржању количине кретања и закона о одржању енергије даје следеће релације:

$$\frac{\rho_1}{\rho_0} = \frac{v_0}{v_1} = \frac{U - u_0}{U - u_1}$$

$$p_1 - p_0 = \rho_0(u_1 - u_0)(U - u_0) \quad , \quad (4.3.1)$$

$$e_1 - e_0 = \frac{p_1 u_1 - p_0 u_0}{\rho_0(U - u_0)} - \frac{1}{2}(u_1^2 - u_0^2)$$

Уколико претпоставимо да су сви параметри са индексом „0“ познати, ако би била позната још једна величина тада бисмо имали четири једначине и пет непознатих. У том случају, ако знамо вредност једне од ових непознатих величина, све преостале непознате величине би се могле израчунати.

Додатна једначина се назива *Hugoniotova* једначина и представља везу између било које две од пет разматраних величина. Једначина дефинише криву на којој се налазе сва могућа равнотежна стања материјала при проласку ударног таласа. Одређује се емпиријски и може се написати у једноставном линеарном облику:

$$U = c_0 + su \quad , \quad (4.3.2)$$

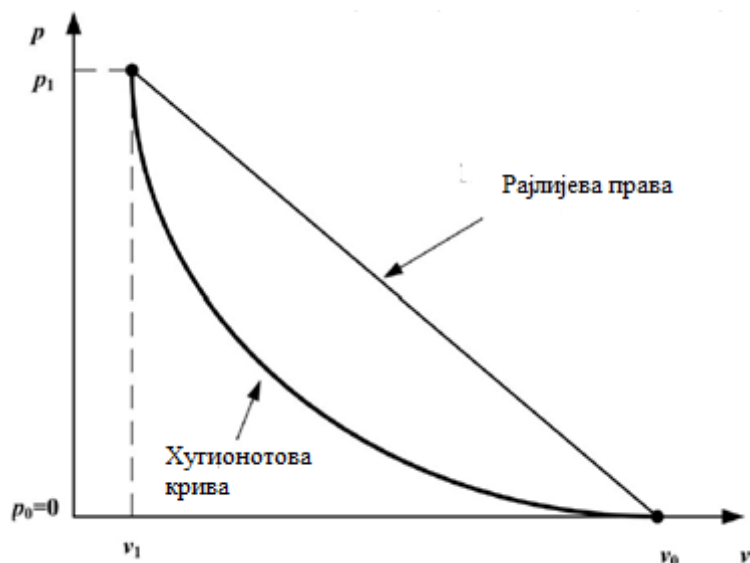
где су:

c_0 – параметар близак запреминској брзини звука у материјалу,

s – коефицијент који се утврђује експерименталним путем.

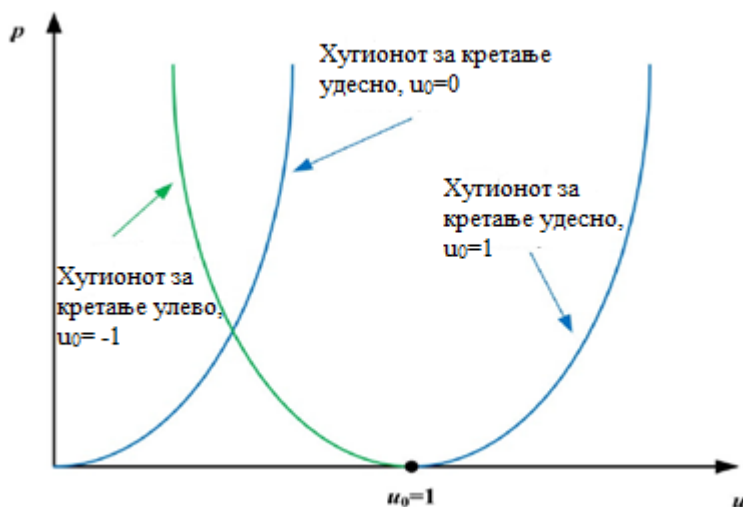
Такозвани „скок“ физичких величина реализује се путем ударног таласа, а промена стања одвија се дуж *Rayleighjeve* линије. [1]

На слици 12 је приказана *Hugoniotova* једначина и *Rayleighjeva* линија у p - v дијаграму.



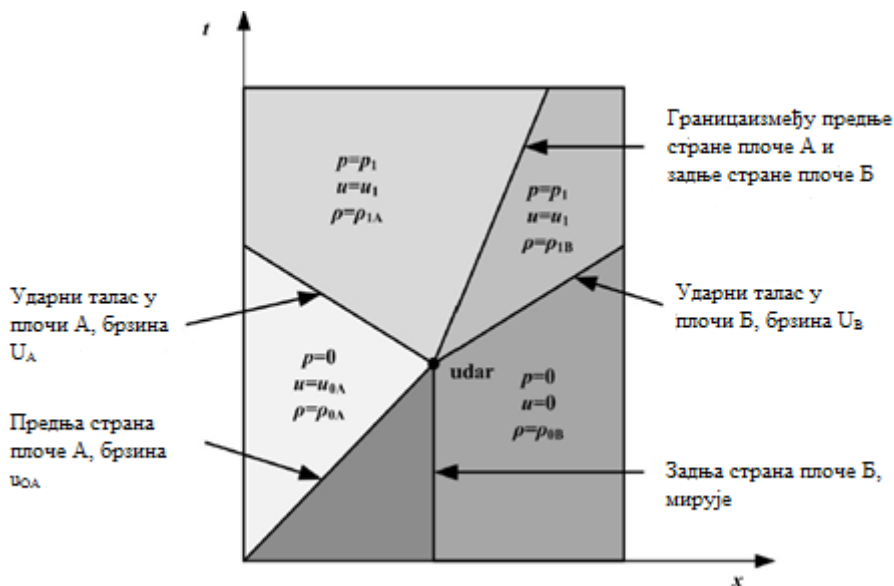
Слика 12: *Hugoniotova* једначина и *Rayleighjeva* линија у p - v дијаграму [1]

На слици 13 је приказан пример *Hugoniotove* једначине у p - u дијаграму за различите вредности почетне брзине материјала и различите смерове кретања ударног таласа.



Слика 13: *Hugoniotova* једначина у p - u дијаграму за различите вредности почетне брзине материјала и различите смерове кретања ударног таласа [1]

На слици 14 је дат пример генерисања ударних таласа при удару плоче А која се креће великом брзином у плочу В која мирује. Ударни талас се формира у оба материјала, а због услова компатибилности, у зонама кроз које је прошао ударни талас брзина и притисак имају исту вредност. Проблем судара две плоче је приказан у t - x координатном систему. [1]



Слика 14: Дијаграм у t - x координатном систему за проблем судара две плоче [1]

5 МЕХАНИКА ПЕНЕТРАЦИЈЕ

Под пробијањем (пенетрацијом) се подразумева процес који започиње ударом пенетратора у препреку и наставља се његовим кретањем кроз структуру препреке. При томе се под

пенетратором подразумева свако тело намењено за пробојно дејство, док се препреком сматра средина изложена истом дејству.

На процес пенетрације утиче велики број параметара који се односе на карактеристике пенетратора. Постоји велики број критеријума за категоризацију пенетрационих процеса.

Основна класификација везана је за врсту материјала препреке.

Најчешће се разматра процес пробијања следећих врста материјала препреке:

- метали (челици и лаки метали),
- бетон и армирани бетон,
- тло (различити типови земљишта),
- керамички материјали и стакло,
- полимери и влакнима ојачани пластични материјали,
- тканине и композитни влакнасти материјали.

Важну карактеристику препреке представља и њена дебљина. Са становишта дебљине разликујемо четири врсте препреке:

- полубесконачне препреке – теоријски се ради о апстрактној препреци која у ствари чини полупростор. Под полубесконачном препреком подразумева се и препрека довољно велике дебљине код које се утицај задње површине препреке на процес пробијања може занемарити.
- дебеле препреке и препреке средње (умерене дебљине) карактерише више или мање значајан утицај задње, слободне површине препреке на процес пенетрације,
- танке препреке су дефинисане непроменљивошћу напона смицања дуж целе дебљине препреке.

За анализу су значајне и попречне димензије препреке.

С обзиром на број слојева разликују се:

- монолитне (једнослојне) и
- вишеслојне препреке.

Врста пенетратора такође утиче на карактер процеса пробијања. Значајне су следеће врсте пенетратора:

- пројектили који се испаљују из стрељачког наоружања (пиштољи, аутомати, пушке и митраљези),
- фрагменти кошуљице разорних пројектила,
- пенетратори поткалибарних пројектила,
- кумулативни млаз, који настаје преобликовањем облоге кумулативних пројектила,
- преобликовани диск.

Прве две категорије пенетратора спадају у групу пенетратора релативно мале енергије и намењене су за деловање против лако заштићених циљева, а преостале три групе пенетратора имају високу енергију и у правилу су намењене за противоклопно дејство.

За пенетрациони процес су важни и почетни услови при иницијалном контакту пенетратора и препреке – ударна брзина и ударни угао пенетратора. [1]

5.1 Типови пенетрационог процеса

1. Пластично формирање отвора

Овај механизам пенетрације типичан је за пенетраторе високе крутости са оштрим врхом и препреке које карактерише изразита пластичност. После почетног утискивања пенетратора, долази до пластичног деформисања материјала препреке и његовог потискивања у радијалном правцу. На задњој површини препреке се формира испупчење, док на предњој може доћи до мањег испупчења, венца или до расцветавања. Пластично деформисање отвора је механизам пробијања коме је својствена велика апсорпција енергије пенетратора и који минимизује ефекте деловања пенетратора иза препреке. [1]

2. Пробијање путем формирања одсечка

Карактеристично је за пенетраторе са тупим врхом и танке препреке значајне чврстоће и пластичности. Основна карактеристика овог режима је формирање цилиндричног одсечка материјала препреке чији је пречник приближно једнак пречнику пенетратора. Доминантна напрезања препреке у току процеса су сабијање и смицање одсечка. Овај режим пенетрације карактерише знатно мања апсорпција енергије пенетратора и долази до генерисања одсечка. [1]

3. Расцветавање препреке

Расцветавање препреке је специфичан механизам пробијања који се одиграва у случају крутих пенетратора са оштрим врхом, препрека изражене пластичности и релативно мале дебљине, при ударним брзинама које су нешто веће од минимално потребне вредности да би се остварио пробој. Специфична појава је генерисање великих циркуларних напона у материјалу препреке који изазивају формирање „латица“. [1]

4. Формирање зарубљеног конуса

Овај режим пробијања је карактеристичан за материјале препреке који имају изражену кртост. После удара пројектила тупог врха великом брзином у крту препреку, долази до формирања *Hertzovih* прслина које се појављују најпре око контактне површине. Под дејством импулса пројектила ове прслине настављају да се брзо простиру конусно. На тај начин ствара се једна врста конусног одсечка који се услед смицања одваја од остатка препреке. [1]

5. Дробљење материјала

Дробљење материјала је механизам процеса пенетрације сличан формирању зарубљеног конуса. Ако се ради о удару великом брзином, у зони конуса испред пројектила може да дође до дробљења материјала. [1]

6. Хопкинсов ефекат

Разматрања везана за контактну детонацију значајна су за развој противоклопне муниције чије је дејство засновано на принципу Хопкинсовог ефекта, који гласи: као последица таласних појава које прате детонацију високобрзантног експлозивног пуњења на површини

оклопа долази до одваљивања материјала на страни супротној од места удара пројектила у оклоп.

Разарање при импулсном оптерећењу зависи од низа појава и околности везаних за интензитет, облик и простирање таласа напрезања, геометрију и понашање оптерећеног тела:

- при импулсном оптерећењу могу постојати локална пролазна напонска стања и деформације, па разарање у том случају настаје у једном делу нападнутог тела, потпуно независно од стања у другим деловима; напонска стања у телу изложеном импулсном оптерећењу могу се тако брзо мењати да разарања не успевају да прате промену напонског стања;
- у великом броју случајева разарање је у непосредној вези са неједнородношћу напрезања која настају интерференцијом два или већег броја таласа напрезања;
- импулсно оптерећење са изузетно великим амплитудама и брзинама пораста оптерећења у многим случајевима значајно мењају механичка својства оптерећеног материјала. [2]

Разарање при контактної детонацији које се манифестује одваљивањем слоја материјала на страни препреке супротној од контактне површине, настаје у основи као последица интерференције компресионог таласа побуђеног детонацијом и таласа истезања насталог одбијањем компресионог таласа од слободне површине препреке. [2]

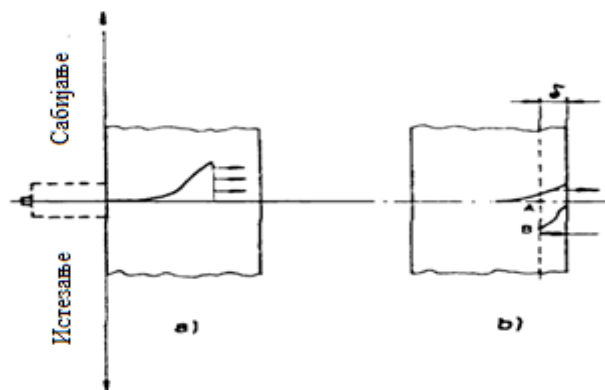
На слици 15 је приказано кретање таласа у плочи при појави одваљивања.



Слика 15: Кретање таласа у плочи при појави одваљивања [2]

Ако је еластична плоча, бесконачних трансверзалних димензија и коначне дебелине, изложена дејству контактне детонације цилиндричног пуњења високобризантног експлозива коначних димензија, компресиони талас који се преноси кроз плочу, одбија се од слободне површине плоче у виду таласа истезања (слободна површина плоче представља границу између две средине различитих густина). [2]

На слици 16 су приказани таласи напрезања у еластичној плочи изазвани контактном детонацијом.



Слика 16: Таласи напрезања у еластичној плочи изазвани контактном детонацијом

а) компресиони талас пре сусрета са слободном површином плоче

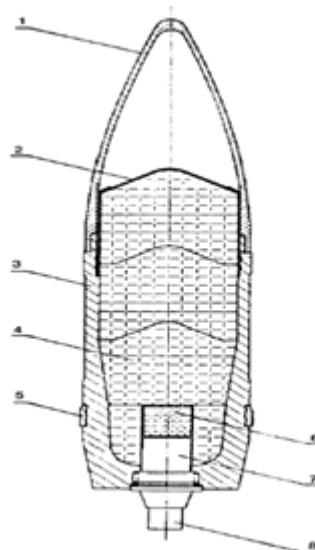
б) напонско стање непосредно након одбијања компресионог таласа од слободне површине плоче [2]

Интерференцијом компресионог и одбијеног таласа истезања добија се резултујуће напонско стање у слоју плоче блиском слободној површини. Са повећањем растојања чела одбијеног таласа од слободне површине плоче расте вредност напрезања на истезање. Ако вредност овог истезања достигне вредност коју материјал плоче не може да поднесе, долази до разарања – одваљивања слоја материјала плоче. До одваљивања долази онога тренутка када напрезање достигне вредност критичног рушећег нормалног напрезања.

Хопкинсов ефекат је искоришћен за развој посебне врсте пројектила за разарање чврстих препрека контактном детонацијом. Ефекат се испољава само ако је препрека од челика, бетона или армираног бетона, а у свим осталим случајевима пројектил дејствује као разорни пројектил парчадно – рушећег дејства. [2]

На слици 17 је приказан пројектил на принципу Хопкинсовог ефекта.

1. Балистичка капа
2. Покривка ЕП
3. Кошуљица пројектила
4. ЕП
5. Ротирајући прстен
6. Детонатор
7. Осигурач
8. Трасер

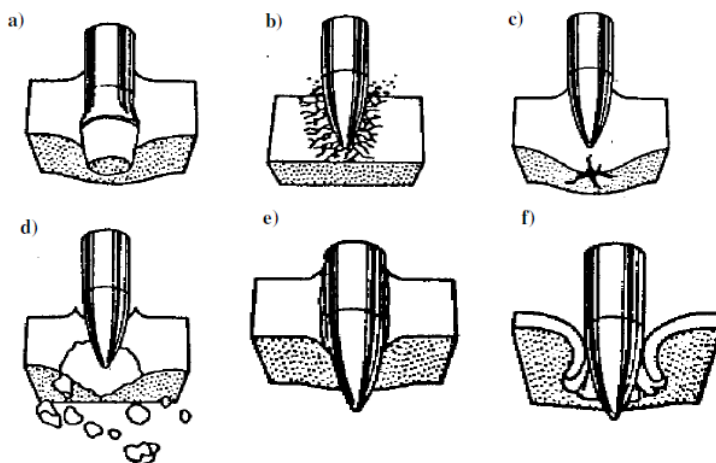


Слика 17: Пројектил на принципу Хопкинсовог ефекта [2]

7. Ерозија материјала

У случају даљег повећања ударне брзине пенетратора може се показати да динамички притисак превазилази вредност чврстоће материјала препреке и пенетратора. Тада се материјали препреке и пенетатора понашају слично течностима и кажемо да долази до њихове ерозије или трошења. Карактеристичан је за пенетрацију кумулативног млаза и поткалибарних пројектила. [1]

На слици 18 су приказане све врсте пенетрационих процеса.



Слика 18: Основни типови пенетрационих процеса

а) формирање одсечка, б) дробљење, в) формирање радијалних напрелина, г) фрагментација, е) формирање отвора у препреци, ф) расцветавање препреке [1]

Разликују се четири исхода процеса пенетрације:

- пробој – подразумева пролазак целог пенетратора кроз препреку;
- продор – представља гранични случај пробијања јер је отвор у препреци неправилног облика и мање површине од површине попречног пресека пенетратора;
- задор – карактерише заустављање пенетратора у препреци;
- рикошет – представља одбијање пенетратора услед клизања по површини препреке уколико је она нагнута.

Под пробојношћу пенетратора подразумева се његова пробојна моћ – способност пробијања препреке.

Отпорност препреке подразумева ниво способности одупирања пробијању.

При разматрању пробојности велики значај имају три брзине: ударна, излазна и брзина балистичког лимита.

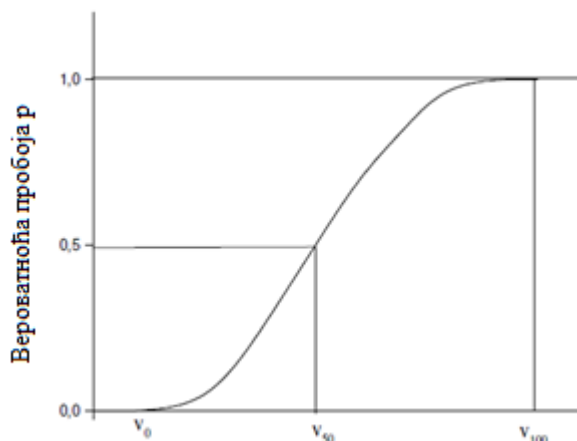
Ударна брзина v_s је тренутна вредност линијске брзине пенетратора у моменту иницијалног контакта са препреком.

Излазна (резидуална) брзина v_r је брзина пенетратора у тренутку проласка дна пенетратора кроз раван одређену задњом површином препреке.

Брзина балистичког лимита v_L је једна од основних карактеристика система пенетратор – препрека. Реч је о минималној вредности ударне брзине при којој долази до пробоја , односно максималној вредности ударне брзине при којој не долази до пробоја препреке. [1]

$$v_L = \frac{1}{2} (v_{s, \min} + v_{s, \max}) \quad (5.1.1)$$

На слици 19 је приказана вероватноћа пробијања препреке у зависности од ударне брзине пенетратора.



Слика 19: Вероватноћа пробијања препреке у зависности од ударне брзине пенетратора [1]

При удару пројектила у препреку кинетичка енергија пројектила претвара се мањим или већим делом у механички рад разарања циља, при чему долази до пробијања препреке. У општем случају кинетичка енергија пројектила при удару трансформише се у шест различитих облика енергије:

$$E_k = \frac{mv_o^2}{2} = E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + E_5 + E_6 \quad (5.1.2)$$

где су:

E_1 – енергија која се троши на савлађивање кохезионих сила, тј. на међусобно раздвајање честица материјала препреке,

E_2 – енергија која се троши на давање извесног убрзања раздвојеним честицама,

E_3 – енергија која се троши на деформисање самог пројектила,

E_4 – енергија која се троши на трење,

E_5 – енергија која се троши на еластичне осцилације препреке,

E_6 – енергија која се троши на формирање ударног таласа у препреци. [1]

5.2 Пробијање танких металних плоча

Под танким плочама подразумевају се плоче довољно мале дебљине да се промене напона дуж дебљине препреке могу занемарити. Други критеријум је повезан са односом времена

која су потребна да се приликом удара генерисани таласи деформација рефлектују од задње стране препреке.

Трофазни модел – у случају пробоја, процес увек пролази кроз три различите фазе и заснован је на примени закона кретања тела променљиве масе.

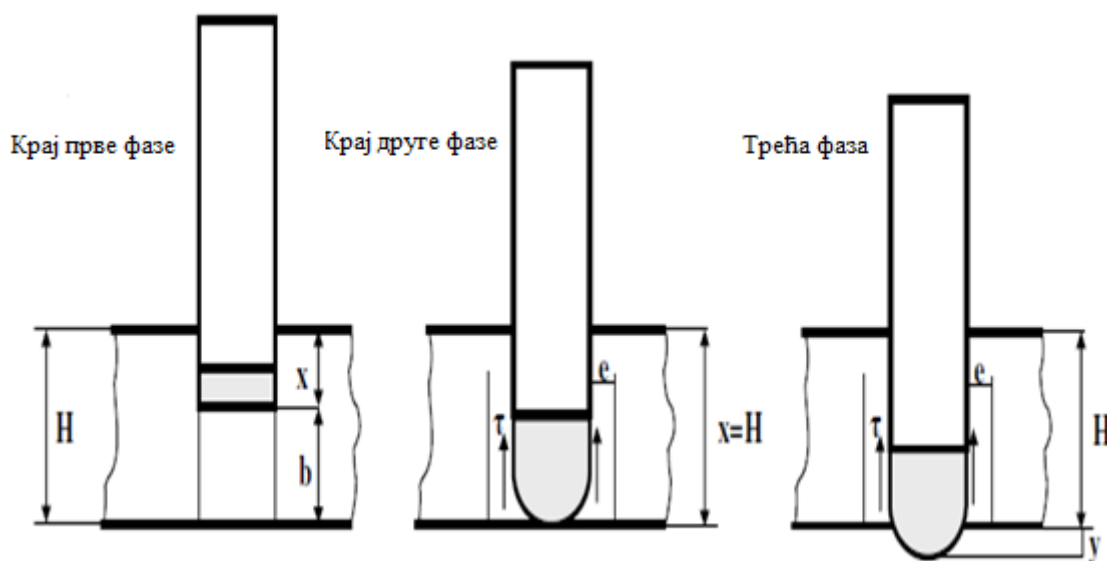
Битна карактеристика модела је да он захтева познавање три важна параметра процеса, а то су:

- улазни и излазни пречник отвора D у препреци који дефинише меродавну површину препреке A изложену сабијању,
- дужина одсечка b која представља кључни параметар пенетрације,
- ширина зоне смицања e .

Три фазе процеса пенетрације:

- прва фаза (утискивање пенетратора) окончава се достизањем дубине пенетрације дефинисане дужином одсечка и отпочињањем смицања,
- друга фаза – доминира смицање одсечка и она се завршава потпуним формирањем одсечка и његовим придодавањем пенетратору,
- трећа фаза траје све док се не оствари критична вредност деформације материјала препреке, односно потпуно одвајање одсечка од препреке. [1]

На слици 20 је приказан трофазни модел пенетрације.

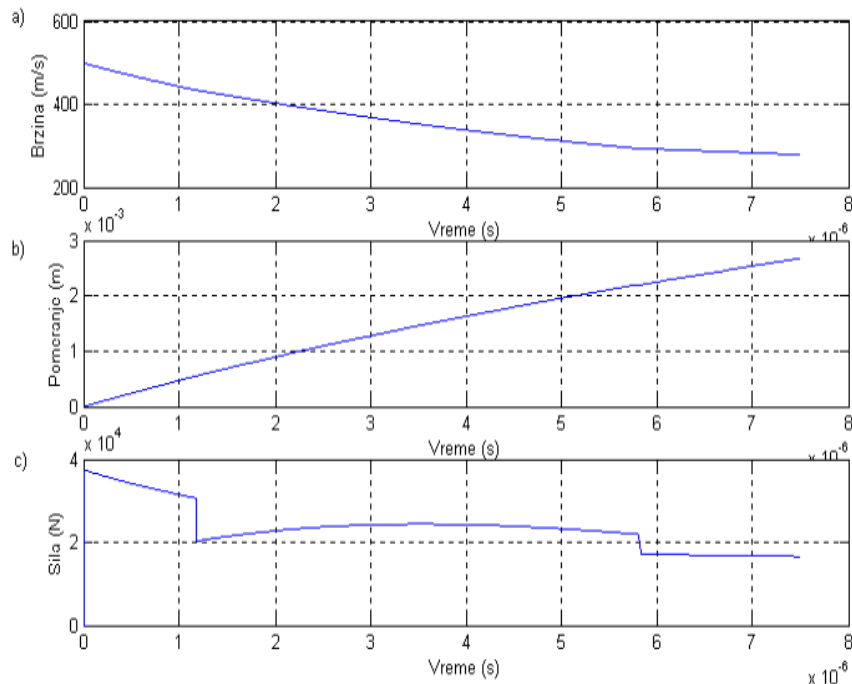


Слика 20: Трофазни модел пенетрације [1]

5.3 Пробијање алуминијумских препрека

Алуминијум је материјал изражене пластичности, а важна особина алуминијумских препрека је да се пробијање најчешће одвија у режиму пластичног формирања отвора. Формирање одсечка представља релативно редак феномен ако пројектил нема раван врх. [1]

На слици 21 су приказане типичне зависности брзине, померања и силе отпора које се добијају применом трофазног пенетрационог модела.



Слика 21: Типичне зависности брзине, померања и силе отпора које се добијају применом трофазног пенетрационог модела [1]

5.4 Пробијање бетонских препрека

Бетон најчешће има знатно већу чврстоћу на притисак него на затезање, што га чини осетљивим на оштећења услед одбијања компресионог ударног таласа од задње површине препреке. Бетон може да буде и армиран, што повећава његову чврстоћу и жилавост. Модел пробијања бетонских препрека подразумева нормалан удар крутог пројектила у равну бетонску препреку. Разматра се цилиндрични пројектил калибра d , са оживалним врхом.

Аксијална сила отпора износи:

$$F = \frac{\pi}{4} d^2 (\tau_0 + NB\rho v^2) \quad (5.4.1)$$

где су:

τ_0 - утицај смицања материјала,

ρ - густина бетона,

v - тренутна вредност брзине пројектила,

N - утицај облика предњег дела пројектила на отпор препреке услед сабијања,

B - параметар који узима у обзир чињеницу да је део материјала препреке који је изложен сабијању обложен, што ефективно може да доведе до повећања отпора. [1]

5.5 Пробијање тла и дубина продирања у тло

Размотримо цилиндрични пројектил масе m са произвољним оносиметричним обликом предњег дела, који удара у тло почетном брзином v_0 и наставља праволинијско кретање при чему је v тренутна вредност брзине.

Приступ заснован на локалној интеракцији пројектила и препреке успоставља следећу релацију између нормалног напона на притисак који делује на пројектил и одговарајуће нормалне брзине „ширења отвора“ у препреци v_n :

$$\sigma_n = A\sigma_y + B\rho v_n^2, \quad (5.5.1)$$

где су:

σ_y - напон течења материјала,

A – параметар који зависи од врсте тла,

B – карактеристика тла,

ρ – густина материјала препреке. [1]

Резултујућа аксијална сила отпора кретању пројектила добија се интеграцијом нормалних и тангентијалних напона по целој површини предњег дела пројектила: [1]

$$F = \frac{\pi}{4} d^2 (A\sigma_y N_1 + B\rho v^2 N_2), \quad (5.5.2)$$

где су N_1 и N_2 бездимензиони параметри који зависе од геометрије врха пројектила и коефицијента трења.

Дубина продирања пројектила у тло P износи: [1]

$$P = \frac{2m}{\pi d^2 B\rho N_2} \ln \left(1 + \frac{B\rho N_2 v_0^2}{AN_1\sigma_y} \right), \quad (5.5.3)$$

5.6 Пробијање керамичких препрека

Потреба за развојем нових концепата балистичке заштите коју карактеришу оклопи веће отпорности и мање масе довела је до увођења керамичких материјала као важне компоненте сложених оклопа. Предности керамике као материјала су: релативно мала густина, велика тврдоћа и притисна чврстоћа, док су недостаци изражена кртост и ниска затезна чврстоћа.

Разматра се нормалан удар цилиндричног пројектила пречника d_p , дужине L_p и масе m_p брзином v_0 у препреку која се састоји од слоја керамике дебљине H_1 , иза кога је чврсто везан слој метала дебљине H_2 .

Процес пробијања у овом случају има следећи ток:

- Врх језгра пројектила, које је најчешће израђено од челика високе тврдоће, услед високих напона којима је изложен због велике ударне брзине најпре се радијално деформише добијајући нови пречник, а затим долази до његове фрагментације. На тај

начин, долази до ерозије врха пројектила која се наставља у току процеса у зависности од интензитета отпора препреке. Деформисани пречник пројектила остаје непромењен до краја процеса пробијања, док се маса пенетратора смањује до одређене вредности. Резидуална маса пенетратора се смањује са повећањем ударне брзине.

- Услед снажних таласа напона у слоју керамике, у року од неколико микросекунди после удара долази до формирања зоне фрагментације керамике која има облик зарубљеног конуса. После тога, језгро пројектила наставља кретање потискујући фрагментисани материјал у конусу. Долази до деформисања металне плоче што омогућава даље кретање фрагментисане керамике. Сви ови процеси са једне стране доводе до дисипације енергије пенетратора, а са друге стране условљавају да већа површина и маса металне плоче учествује у даљем току процеса. Како пројектил наставља кретање кроз препреку, оптерећење се усмерава на све мању површину металне препреке. На крају процеса, уколико је енергија пенетратора довољна да савлада отпор металне плоче, долази до перфорације. При томе се формирају два цилиндрична одсечка – керамички и метални, који имају исти пречник као и еродирани пенетратор.

Кинетичка енергија овог система је:

$$E_{kf} = \frac{1}{2} \frac{m_p^2}{m_p + m_t} v_0^2, \quad (5.6.1)$$

где је m_t – укупна маса одсечака.

Закон о одржању енергије може се написати у облику:

$$E_{kf} = \frac{1}{2} (m_{pr} + m_t) v_r^2 + E_{tr} + E_{pf} + E_{pk}, \quad (5.6.2)$$

где су:

E_{tr} - губитак кинетичке енергије услед отпора керамичке и металне плоче,

E_{pf} - енергија потребна за фрагментацију пројектила,

E_{pk} - излазна кинетичка енергија фрагментисаног дела пројектила. [1]

5.7 Пробијање препрека од композитних материјала

Композитни материјали ојачани влакнима су важне компоненте личне балистичке заштите, као и различитих лаких оклопа.

У следећем примеру разматрамо нормалан удар пројектила у влакно. У влакну се после удара јављају два таласа: лонгитудинални талас који се креће брзином звука c и изазива кретање делића влакна ка пројектилу и трансверзални талас који је спорији, креће се брзином u и доводи до кретања делова влакна у смеру кретања пројектила.

Претпостављајући тачкасти удар, константну вредност брзине пројектила и идеално еластично влакно, добијају се следеће релације између поменутих брзина и релативне деформације влакна ε :

$$u = c \left[\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon \right]$$

$$v = c \sqrt{\varepsilon \left(2\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon \right)}$$
(5.7.1)

Једначина кретања пројектила може се написати у облику:

$$m \frac{dv}{dt} = -2F \cos \theta,$$
(5.7.2)

где су:

m - непроменљива маса пројектила,

F - сила у влакну која изазива кретање пројектила,

θ - угао деформације влакана.

У циљу поједностављења проблема усвајају се следеће претпоставке:

- посматра се једнодимензијско понашање тканине,
- релативна деформација је иста у свим слојевима тканине испред пројектила,
- само она влакна која су у директном контакту са пројектилом условљавају његово успоравање.

Сила која се супроставља кретању пројектила може се написати у облику:

$$F = nn_l E \varepsilon S,$$
(5.7.3)

где су:

n - број влакана у директном контакту са пројектилом,

n_l - број слојева тканине,

E – модул еластичности влакана,

S – површина попречног пресека влакана.

Закон о одржању енергије може се писати у следећем облику:

$$\frac{1}{2} m (v_0^2 - v_r^2) = \frac{1}{2} n n_l S E c \int_0^{t_f} \varepsilon^2(t) dt,$$
(5.7.4)

где је t_f – тренутак лома материјала. [1]

6 РУШЕЋЕ ДЕЈСТВО

Рушеће дејство је директна последица експлозије – процеса чија је основна карактеристика изузетно брзо ослобађање енергије. Детонацијом експлозивних материја долази до формирања гасовитих продуката чији је притисак реда $15GPa$ до $40GPa$, а температура од $2000K$ до $4000K$.

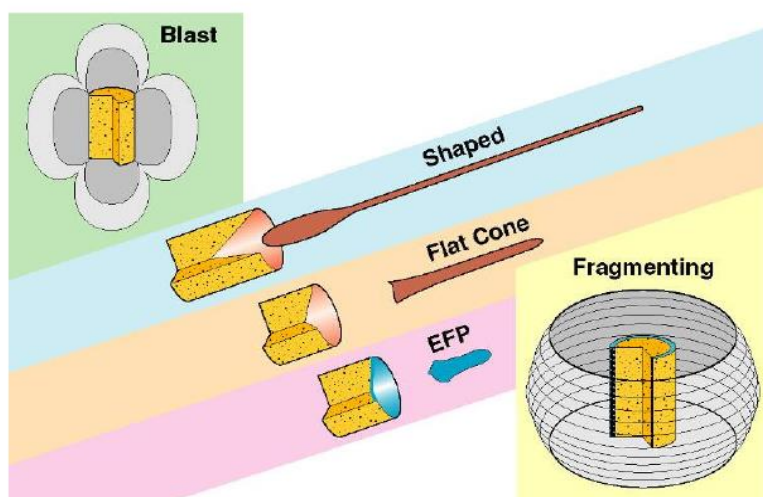
Ови врели гасови високог притиска нагло се шире формирајући примарну зону блиског дејства у којој је притисак гаса и даље веома висок и где су разарања изузетно велика. Ова

зона је ограничена на простор у непосредној близини експлозивног пуњења. У примарној зони за разматрање механичких ефеката и преноса енергије значајна је анализа ширења гасовитих продуката детонације, као и кретање сабијеног околног ваздуха, па се ова зона и назива композитна зона.

У секундарној зони рушећег дејства, на већим растојањима од центра експлозије, притисак значајно опада и довољно је разматрати простирање ударног таласа у околној средини.

Основна особина рушећег дејства је омнидирекционо дејство, што значи да просторно није усмерено. [1]

На слици 22 је приказано рушеће дејство и други видови примене експлозивних процеса у бојним главама.



Слика 22: Рушеће дејство и други видови примене експлозивних процеса у бојним главама [1]

6.1 Зона блиског дејства

Примарна зона блиског дејства продуката детонације дефинисана је првенствено нивоом притиска у гасовитим продуктима детонације. Размотримо детонацију необложеног сферног експлозива радијуса r_e који је инициран у центру сфере. Претпоставићемо да се процес детонације одвија тренутно. Реално, процес детонације сферног експлозива траје:

$$t_d = \frac{r_e}{D}, \quad (6.1.1)$$

где је D – брзина детонације експлозива.

Време трајања детонационог процеса за изабрани експлозив зависи од радијуса сфере. Топлота која је ослобођена у току детонационог процеса износи:

$$Q = \frac{D^2}{2(\gamma^2 - 1)}, \quad (6.1.2)$$

при чему је γ - политропски коефицијент који карактерише продукте детонације.

Унутрашња енергија продуката детонације може се написати у облику:

$$E = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{p_d}{\rho_d}, \quad (6.1.3)$$

где је ρ_d - густина продуката детонације која је једнака густини експлозива.

Почетни притисак продуката детонације је:

$$p_d = \frac{\rho_e D^2}{2(\gamma + 1)}. \quad (6.1.4)$$

Ако претпоставимо да је ширење продуката детонације сферно, када продукти детонације достигну радијус r , њихов притисак ће бити одређен изразом:

$$p = p_d \left(\frac{r_e}{r} \right)^{3\gamma}. \quad (6.1.5)$$

При експанзији продуката детонације, њихов притисак опада на вредност мању од 1bar . Самим тим, притисак у продуктима детонације постаје значајно мањи од притиска у ударном таласу који се формира у околној средини. Истовремено, долази и до значајног пада брзине самих продуката детонације и почиње њихово мешање са околним ваздухом.

На величину зоне блиског дејства утичу карактеристике околне средине, као и саме експлозивне материје, нарочито биланс кисеоника. У случају негативног биланса кисеоника, продукти детонације могу да реагују са кисеоником из ваздуха и повећају количину ослобођене енергије.

Зону блиског дејства карактеришу високи притисци, како ударног таласа, тако и продуката детонације и снажно деструктивно дејство. Ова зона представља домен експлозивне пропулзије, тј. разматрани високи притисци продуката детонације могу да убрзају околни материјал што доводи до парчадног дејства. У зони блиског дејства гасови имају високу температуру, што доводи до значајних термичких оптерећења и изазивања пожара. [1]

6.2 Простирање ударног таласа у ваздуху

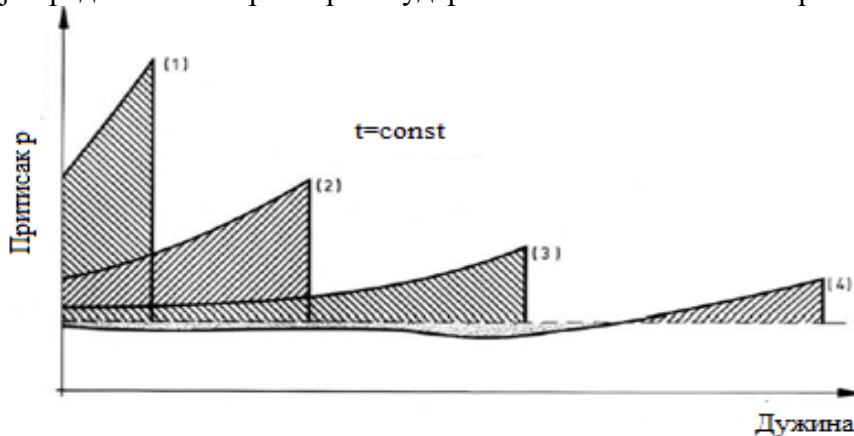
Детонацијом експлозива долази до формирања гасовитих продуката који почињу да се шире великом брзином. Ова експанзија изазива померање слоја ваздуха који се налази непосредно уз продукте детонације. Брзина кретања ове зоне ваздуха је знатно већа од брзине звука у ваздуху, што за последицу има формирање фронта ударног таласа у ваздуху непосредно испред гасовитих продуката детонације. Ово доводи до тренутног повећања притиска ваздуха у односу на амбијентални атмосферски притисак. [1]

У сферичном моделу ударног таласа, енергија E се моментално претвара у идеални гас густине ρ и специфичног топлотног коефицијента γ . Почетна енергија је локализована у референтној тачки и производи сферични ударни талас, радијуса R од центра експлозије.

Већину времена, притисак средине p_1 је занемарен у односу на притисак фронта ударног таласа p_2 .

Ова претпоставка је у потпуности подржана када је могуће занемарити унутрашњу енергију идеалног гаса у мировању у односу на иницијалну енергију E (јака експлозија). Како било, експериментални услови у амбијенталном ваздуху, укључујући мерења притиска средине морају укључити ефекат притиска гаса у мировању. [6]

На слици 23 је представљено простирање ударног таласа за неколико временских тренутака.

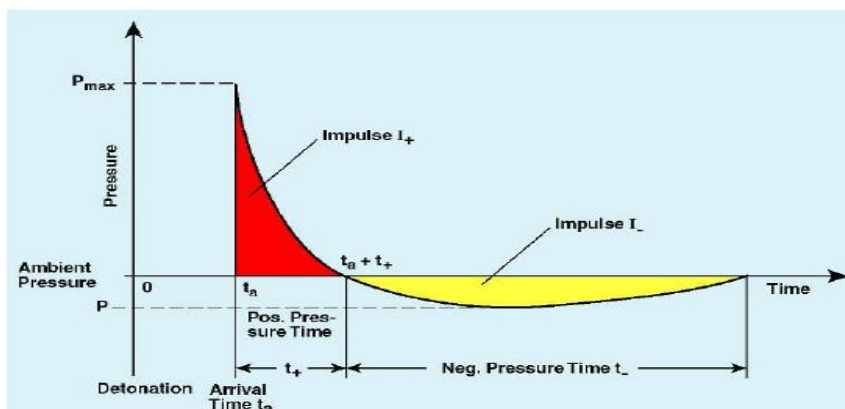


Слика 23: Простирање ударног таласа за неколико временских тренутака [1]

У тренутку t_1 , уочавамо да испред ударног таласа нема промене притиска, док натпритисак има највећу вредност непосредно иза ударног таласа. Услед брзог простирања ударног таласа и ширења продуката детонације, у зони иза ударног таласа ка центру експлозије натпритисак се смањује и његова вредност у центру је приближно два пута мања него у фронту ударног таласа. У тренуцима t_2 и t_3 натпритисак има сличан профил, али се његова максимална вредност смањује са удаљавањем од центра експлозије. Ваздух захваћен ударним таласом креће се у правцу простирања таласа, односно брзина ветра ударног таласа има смер кретања таласа. У тренутку t_4 , због инерције ваздуха, долази до пада притиска иза ударног таласа на вредност мању од околног атмосферског притиска, односно долази до формирања парцијалног вакуума. [1]

Иста појава се може посматрати и у координатном систему притисак – време.

На слици 24 је приказана типична промена притиска са временом на одређеном константном растојању од центра експлозије.



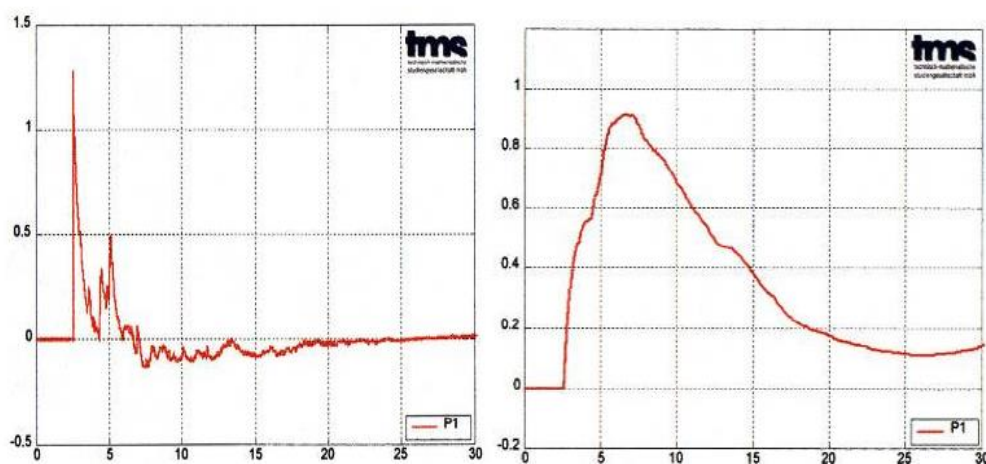
Слика 24: Промена притиска са временом на одређеном растојању од центра експлозије [1]

У тренутку t_a ударни талас долази до разматраног положаја и притисак нагло расте на максималну вредност која се назива максимални (вршни) натпритисак. Притисак затим веома брзо опада до вредности атмосферског притиска. Време трајања натпритиска обележено је са t_+ . Због утицаја инерције притисак наставља да опада достижући највећу вредност потпритиска. Време трајања ове фазе негативног притиска означено је са t_- . Негативна фаза процеса коју карактерише појава потпритиска траје дуже и има мањи интензитет од позитивне фазе са снажним натпритиском. Коначно, притисак се враћа на вредност амбијенталног притиска после укупног времена.

Са повећањем удаљености циља од места експлозије, трајање позитивне фазе процеса се продужава, али се смањује вредност максималног притиска.

Ветар ударног таласа, на извесном фиксном растојању од центра експлозије има најпре смер који одговара смеру простирања ударног таласа. Ова брзина се смањује, да би услед створеног потпритиска променила смер ка центру експлозије. [1]

На слици 25 су приказане измерене вредности притиска и импулса притиска при детонацији 1 kg пентрита на растојању од 3 m од центра експлозије.



Слика 25: Измерене вредности притиска и импулса притиска при детонацији 1 kg пентрита на растојању од 3 m од центра експлозије [1]

6.3 Одређивање параметара ударног таласа

Параметри рушећег дејства суштински су везани за количину енергије која се ослобађа при детонацији и трансформише у енергију ударног таласа. Ова енергија зависи од масе и врсте коришћеног експлозива.

Било који експлозивни састав се у енергетском смислу представља еквивалентном масом ТНТ – а. ТНТ еквивалент W представља масу ТНТ – а која обезбеђује исту количину ослобођене енергије као и разматрана маса стварно коришћеног експлозива.

Еквивалентна маса ТНТ – а W одређује се из релације:

$$W = q_{\text{TNT}} \cdot M_E, \quad (6.3.1.)$$

где су:

q_{TNT} - фактор ТНТ еквивалента који представља однос енергије ослобођене детонацијом 1 kg те материје према енергији ослобођеној детонацијом 1 kg ТНТ – а,

M_E - маса коришћеног експлозивног састава.

Рушећи ефекат је заснован на емитовању ослобођене енергије експлозива у околну средину. За квантификовање овог ефекта на одређеном растојању од центра експлозије меродавна је густина ослобођене енергије у одговарајућој запремини. С обзиром да је ослобођена енергија пропорционална маси експлозива, јасно је да је специфична енергија обрнуто пропорционална скалираном растојању од центра експлозије, које је дефинисано изразом:

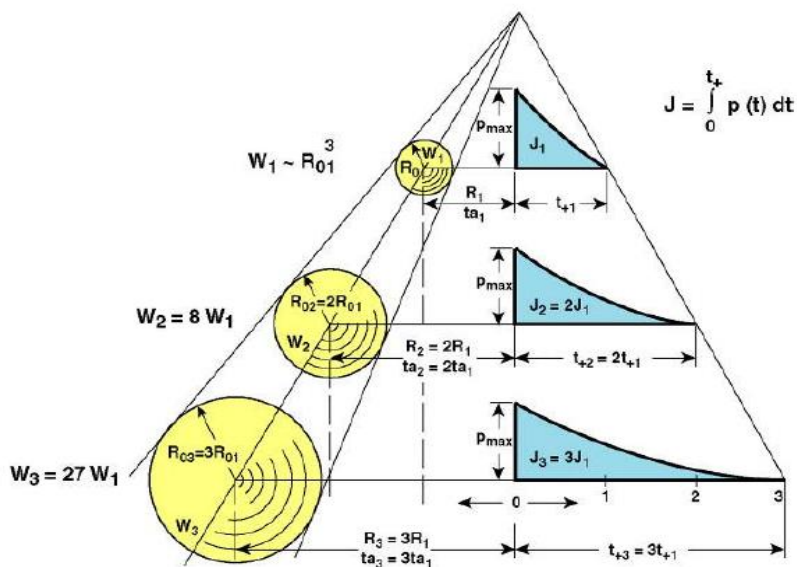
$$Z = \frac{R}{W^{1/3}}, \quad (6.3.2)$$

где је R – стварно растојање од центра експлозије.

Експерименталним путем је показано да максимални натпритисак у ваздуху, који је последица наилаaska ударног таласа изазваног експлозијом, зависи само од скалираног растојања.

Ако желимо да остваримо приближно исти рушећи ефекат на двоструко већем растојању од првобитног, тада скалирано растојање мора остати непромењено, односно масу експлозива морамо да повећамо 8 пута. За троструко повећање радијуса деловања неопходно је масу експлозива повећати 27 пута, итд. При овом скалирању рушећег дејства само вредност максималног натпритиска остаје непромењена, док се остали параметри ударног таласа мењају. [1]

На слици 26 је представљен утицај повећања радијуса рушећег дејства на промену масе експлозива и импулс притиска.



Слика 26: Утицај повећања радијуса рушећег дејства на промену масе експлозива и импулс притиска [1]

Осим максималног натпритиска, постоји још неколико важних параметара који дефинишу својства ударног таласа:

Време доласка ударног таласа t_a може се одредити ако је позната промена максималног натпритиска и износи:

$$t_a = \frac{1}{a_0} \int_{r_e}^R \frac{dR}{M_U}, \quad (6.3.3)$$

где су:

M_U - Махов број,

a_0 - брзина звука у непо ремећеном ваздуху,

r_e - радијус експлозивног пуњења,

R - одређено растојање мерено од центра експлозије.

Време трајања позитивне фазе притиска t_+ показује колико дуго траје оптерећење одређене структуре. Мада је трајање негативне фазе приближно два пута дуже, она се најчешће занемарује у прорачунима будући да је највећа вредност потпритиска знатно мања од максималног натпритиска, па је највећи део оштећења нападнуте структуре у правилу последица деловања позитивне фазе притиска. Време трајање позитивне фазе помножено да одговарајућом брзином ударног таласа идентификује се половином таласне дужине ударног таласа.

Импулс притиска у појединим случајевима може да представља доминантно оптерећење структуре. Импулс притиска односи се само на позитивну фазу и има облик:

$$I = \int_{t_a}^{t_a+t_+} p(t) dt \quad (6.3.4)$$

Ради се о сили притиска по јединици оптерећене површине која зависи од максималног натпритиска, времена трајања позитивне фазе, али и од облика криве притиска, који је дефинисан параметром a у једначини.

Приближна формула за дужину трајања негативне фазе има облик:

$$t_- = 12.5W^{1/3} \quad (6.3.5)$$

Брзина ударног таласа износи:

$$U = \sqrt{1 + \frac{6p_{\max}}{7p_0}} a_0 \quad (6.3.6)$$

У случају малог интензитета натпритиска, брзина ударног таласа постаје блиска брзини звука, односно ударни талас прелази у звучни талас.

Брзина ваздуха непосредно иза ударног таласа у односу на непо ремећени ваздух може се одредити из релације:

$$u = \frac{2}{\kappa + 1} \frac{M_U^2 - 1}{M_U} a_0 \quad (6.3.7)$$

Густина сабијеног ваздуха после проласка ударног таласа има вредност:

$$\rho = \frac{(\kappa + 1)p_{\max} + 2\kappa p_0}{(\kappa - 1)p_{\max} + 2\kappa p_0} \rho_0 \quad (6.3.8)$$

где је ρ_0 - густина непо ремећеног ваздуха.

Важан параметар ударног таласа је и динамички притисак који је последица кретања сабијеног ваздуха и одређује се на основу претходних релација за густину и брзину ваздуха:

$$q = \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (6.3.9)$$

Ако имамо случај површинских експлозија, код којих до детонације долази када се експлозивно пуњење налази на тлу или близу тла, у том случају све претходне релације морају се модификовати. Површина на којој је дошло до експлозије представља рефлектор енергије експлозије и утиче на ефективно повећање рушећег дејства.

Прорачун натпритиска за случај експлозије на површини тла износи:

$$p_{\max} = \frac{6784}{Z^3} + \frac{93}{Z^{3/2}} \quad (6.3.10)$$

У случају кад је експлозивно пуњење обложено металом (бојеве главе), део топлоте експлозије се троши на убрзавање ове металне облоге. У томе смислу, рушеће дејство оваквог експлозивног пуњења биће еквивалентно дејству одређене масе необложеног пуњења.

За случај цилиндричне металне облоге масе M може се дефинисати критични радијус R_m , при коме долази до лома, односно фрагментације облоге, као и одговарајућа релативна деформација:

$$\varepsilon_f = \frac{R_m - R_0}{R_0}, \quad (6.3.11)$$

где је R_0 - почетна вредност унутрашњег радијуса облоге.

Одређивање меродавне еквивалентне масе експлозивног пуњења одређујемо:

$$W' = q_{TNT} \cdot k_T \cdot k_f \cdot M_E, \quad (6.3.12)$$

где се коефицијенти q_{TNT} , k_T , k_f односе редом на: утицај врсте експлозивне материје, рефлектујућа својства површине и губитке енергије услед убрзавања фрагмената. [1]

6.3.1 Friedlanderova једначина

Након примарног удара таласа, долази до наглог раста притиска, што чини позитивну фазу t^+ . После извесног времена, притисак почиње да опада, враћа се на амбијенталну вредност и улази у негативну фазу. *Friedlander (1946)* је предложио да овај карактеристичан облик таласа може да се опише следећом једначином: [9]

$$P = P_{se} t^{\frac{-t}{t^+}} \left(1 - \frac{t}{t^+} \right), \quad (6.3.1.1)$$

где су:

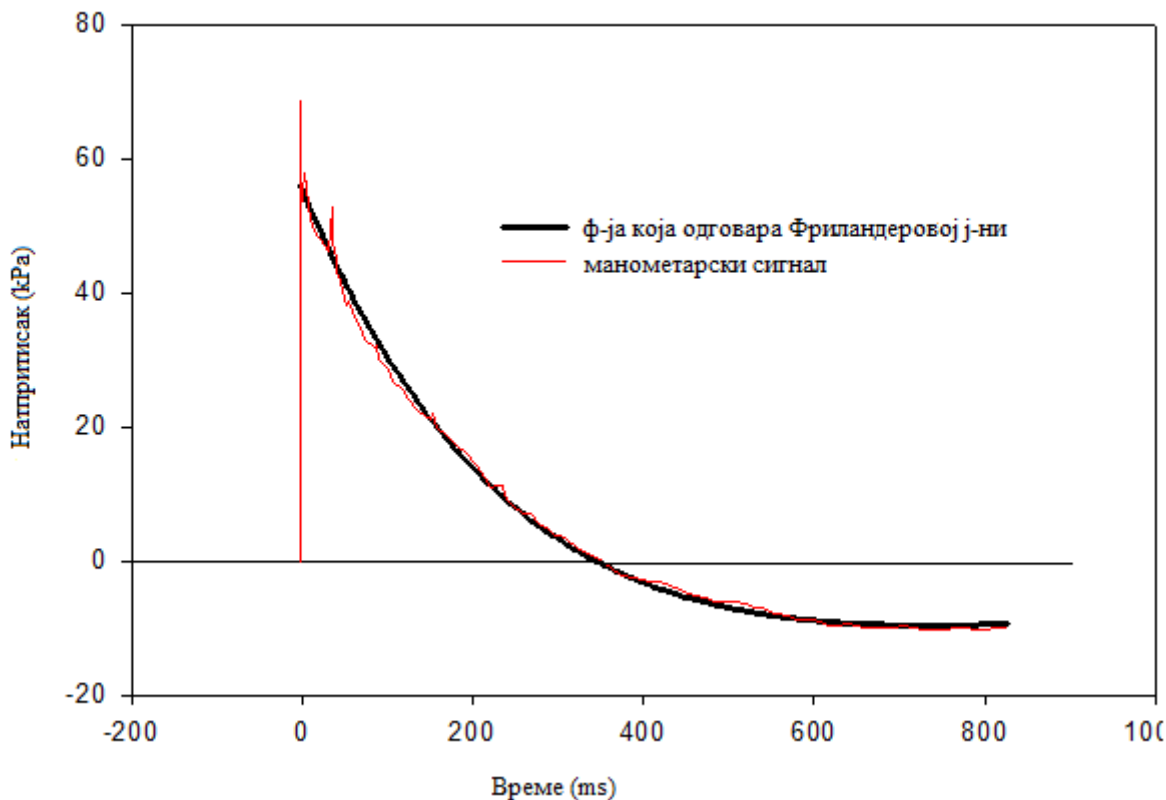
P - натпритисак на фиксираној локацији,

P_s - врхунац натпритиска одмах након примарног удара,

t - време након појаве примарног удара,

t^+ - време трајања позитивне фазе. [9]

На слици 27 је приказан натпритисак у функцији времена на раздаљини од $523.5m$ од центра површинског праска (црвена крива). Црном кривом је приказана функција израчуната према *Friendlander* – овој једначини.



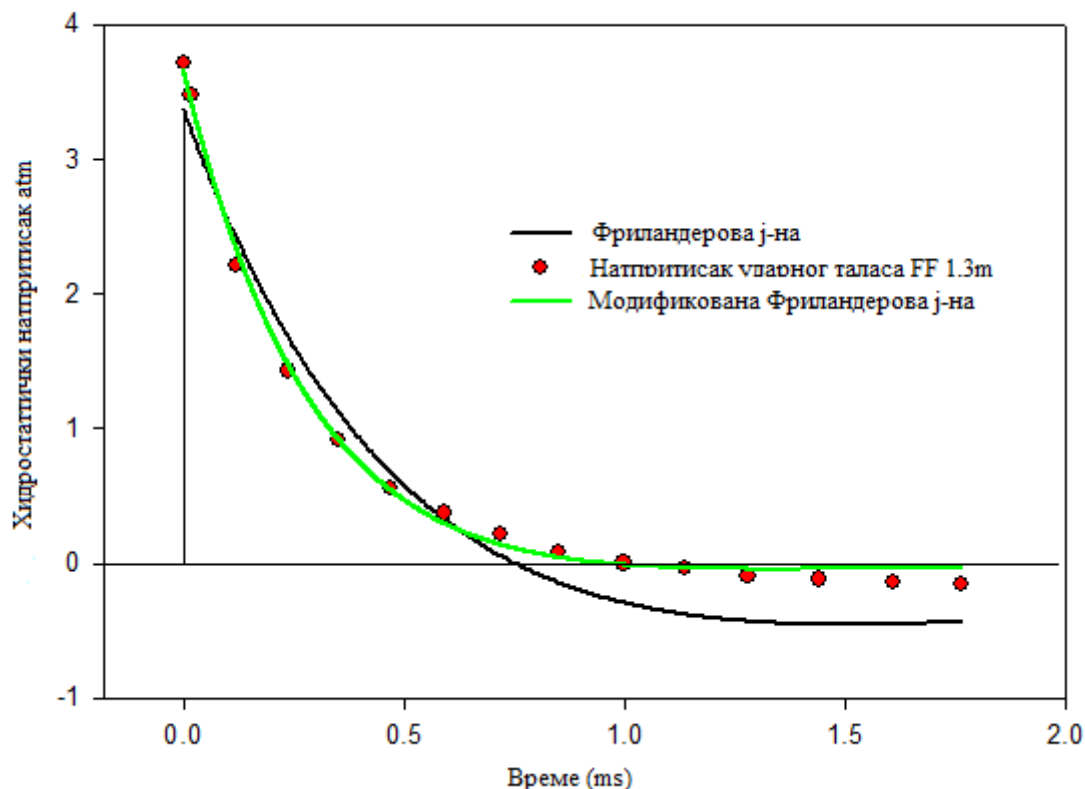
Слика 27: Натпритисак у функцији времена на раздаљини од $523.5m$ од центра површинског праска [9]

Када врхунац натпритиска прелази вредност од једне атмосфере, у том случају *Friendlander* – ова једначина не може тачно да опише притисак у функцији од времена, него је потребно увести нови коефицијент α и изменити једначину. Измењена једначина има следећи облик:

$$P = P_s e^{-\alpha t} \left(1 - \frac{t}{t^+} \right). \quad (6.3.1.2)$$

На слици 28 је приказан хидростатички натпритисак у функцији времена настао експлозијом $1kg$ ТНТ – а (црвена крива). Црном кривом је представљен хидростатички натпритисак у функцији времена добијен према *Friendlander* – овој једначини, док је зеленом кривом

представљен хидростатички натпритисак у функцији времена добијен према измењеној *Friendlander* – овој једначини. [9]



Слика 28: Хидростатички натпритисак у функцији времена настао експлозијом 1kg TNT – а [9]

6.4 Интеракција ударног таласа са препреком

Када ударни талас изазван експлозијом дође у контакт са чврстом подлогом или са препреком чија је густина већа од густине средине у којој се ударни талас простира, долази до његовог одбијања (рефлексије) и евентуално (зависно од облика и величине препреке) скретања (дифракције).

Најједноставнији случај интеракције представља нормална рефлексија ударног таласа. Она настаје када ударни талас наиђе на бесконачну, равну, непокретну и круту препреку под нултим упадним углом (правац кретања таласа је нормалан на раван зида, односно фронт ударног таласа је паралелан са зидом). Тада долази до наглог заустављања кретања ваздуха непосредно уз фронт ударног таласа. Због тога заустављене честице ваздуха имају одређену релативну брзину у односу на честице ваздуха које су удаљене од зида и још увек се крећу. Ова релативна брзина има исту вредност, али супротан смер од изворне брзине честице пре удара у препреку.

Стога се овај процес може посматрати као формирање новог ударног таласа који се креће у супротном смеру од упадног (инцидентног) ударног таласа. Натпритисак у рефлектованом ударном таласу је већи од изворног натпритиска у упадном ударном таласу.

Конечна вредност притиска уз непокретну препреку, иза рефлектованог ударног таласа, може се написати у облику:

$$p_r = 2p_{\max} + (\kappa + 1)q, \quad (6.4.1)$$

где је q – динамички притисак.

Однос интензитета натпритиска у рефлектованом и у инцидентном ударном таласу дефинише коефицијент рефлексије C_R и представља се у облику:

$$C_R = \frac{p_r}{p_{\max}}. \quad (6.4.2)$$

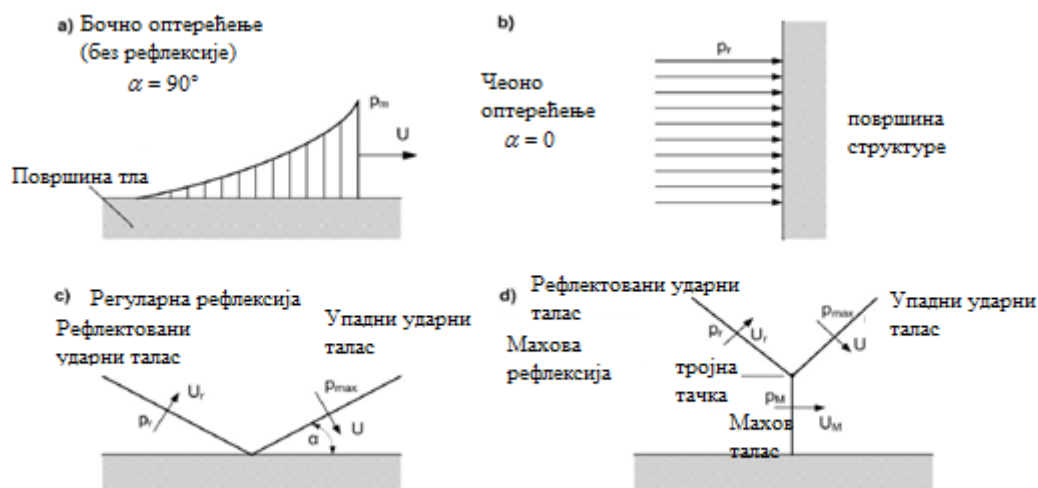
При нормалном наласку ударног таласа на препреку, коефицијент рефлексије је увек у границама између 2 и 8. При веома малим растојањима од центра експлозије долази од јонизације и дисоцијације молекула ваздуха и претпоставка о политропској експанзији ваздуха више не важи.

При нападном углу од 90° заправо нема рефлексије, па на препреку постављену бочно, паралелно са кретањем ударног таласа делује изворни максимални натпритисак. Коса рефлексија ударног таласа настаје при распону упадних углова од 0° до 90° . У овом случају разликујемо регуларну и Махову рефлексију. [1]

Регуларна рефлексија - при малим упадним угловима α инцидентног ударног таласа долази до формирања рефлектованог ударног таласа. Процес привидно подсећа на одбијање звучних таласа, па отуда и термин регуларна рефлексија. У случају ударних таласа, упадни угао није једнак одбојном углу и процес је врло сличан нормалној рефлексији. За сваки гас постоји критична вредност упадног угла при којој је натпритисак у рефлектованом ударном таласу већи од натпритиска при нормалној рефлексији. За дату вредност максималног натпритиска у упадном ударном таласу постоји упадни угао при којем натпритисак у рефлектованом таласу има минималну вредност. За сваку вредност максималног натпритиска у упадном ударном таласу, постоји гранични, односно максимални упадни угао при коме долази до регуларне рефлексије. При упадним угловима већим од граничног, јавља се Махова рефлексија. [1]

Махова рефлексија – Када упадни угао инцидентног ударног таласа пређе граничну вредност, долази до појаве Махове рефлексије. Реч је о сложеном процесу који се манифестује наглим порастом притиска у рефлектованом таласу, услед тога што упадни талас клизи по рефлектујућој површини, а не одбија се од ње као у случају мањих упадних углова. Резултат овог процеса је интеракција рефлектованог таласа са инцидентним таласом и њихово спајање, односно формирање трећег ударног таласа који се назива Махов ударни талас. Тачка у којој се сусрећу три поменута ударна таласа назива се тројна тачка. Коефицијент рефлексије има максималну вредност у зони транзиционих упадних углова блиских граничним угловима при којима отпочиње Махова рефлексија. Са даљим повећањем упадног угла долази до смањења коефицијента рефлексије, који коначно има вредност 1 при упадном углу од 90° , што одговара бочном струјању при коме нема рефлексије. [1]

На слици 29 су приказани различити видови рефлексије ударног таласа.

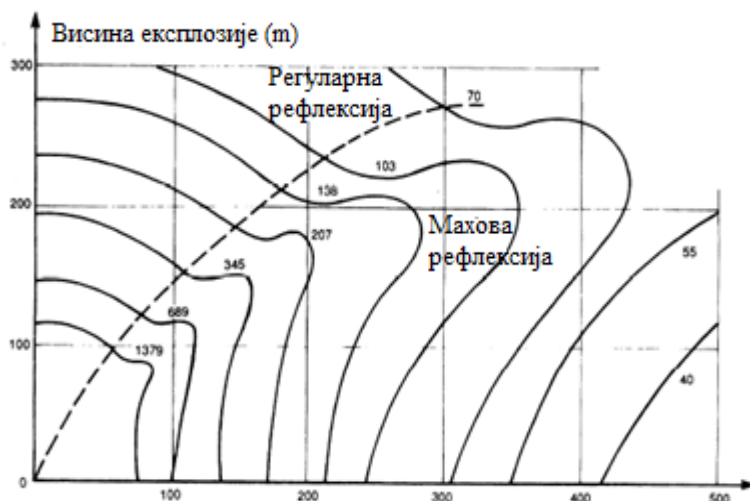


Слика 29: Различити видови рефлексије ударног таласа

а) бочно постављена препрека (нема рефлексије), б) нормална (чеона) рефлексија, в) регуларна рефлексија, г) Махова рефлексија [1]

Махова рефлексија је значајна са аспекта ефеката експлозије на одређеној висини изнад тла и јавља се у случају експлозија у затвореном простору, при чему упадни углови ударног таласа на унутрашње површине оптерећене структуре могу варирати у широком опсегу. [1]

На слици 30 су приказане вредности натпритисака на тлу при нуклеарној експлозији од 1kt у зависности од висине активирања бомбе и удаљености од нулте тачке.



Слика 30: Вредности натпритисака на тлу при нуклеарној експлозији од 1kt у зависности од висине активирања бомбе и удаљености од нулте тачке [1]

Испрекидана линија раздваја зоне регуларне и Махове рефлексије. Имајући у виду ефекат Махове рефлексије, постоји оптимална висина активирања експлозива.

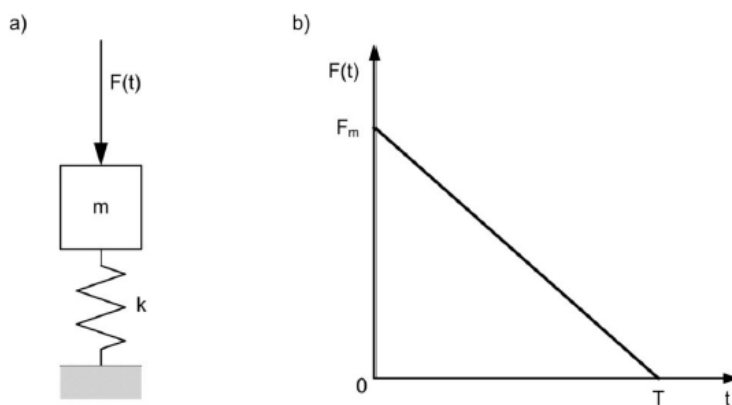
6.5 Деловање ударног таласа

Рушећи ефекат, односно деловање ударног таласа на различите структуре представља врло сложен феномен који подразумева са једне стране одређивање временске промене притиска на разматраној структури, и истовремено, моделирање кретања и деформисања саме структуре у условима великих деформација и великих брзина деформација, при нелинеарном понашању материјала. [1]

6.5.1 Систем са једним степеном слободе

Претпоставићемо да се оптерећена структура може представити као систем са једним степеном слободе – разматра се кретање концентрисане масе m под дејством силе $F(t)$, при чему је k крутост система. Ударни талас такође може бити идеализован као троугаони импулс са максималном силом F_m , и временом трајања позитивне фазе T . [1]

На слици 31 је приказана структура под дејством ударног таласа.



Слика 31: Структура под дејством ударног таласа: а) модел са једним степеном слободе, б) промена оптерећења са временом [1]

Сила представља производ меродавног притиска ударног таласа и одговарајуће површине структуре. Најчешће разматрамо само позитивну фазу притиска. Ако се има у виду експоненцијални пад притиска и ако претпоставимо да је $T=t_+$, онда ћемо имати конзервативни приступ јер је прорачунски импулс притиска већи од стварног. Могуће је одредити вредност $T < t_+$, тако да прорачунски импулс одговара стварној вредности импулса притиска.

Сила која оптерећује структуру у функцији времена може се написати у облику: [1]

$$F(t) = \begin{cases} F_m \left(1 - \frac{t}{T}\right), & 0 \leq t \leq T \\ 0, & t \geq T \end{cases}, \quad (6.5.1.1)$$

док импулс силе ударног таласа има вредност: [1]

$$I = \frac{1}{2} F_m T. \quad (6.5.1.2)$$

6.5.2 Режи́ми оптереће́ња

Размотримо сада граничне случајеве понашања оптерећене структуре у зависности од дужине трајања оптерећења T и сопственог периода осциловања структуре T_s . Важна карактеристика система је и фактор динамичког оптерећења који представља однос максималног померања структуре y_m под деловањем динамичке силе $F(t)$ и померања при статичким условима, под дејством силе F_m :

$$f = \frac{y_m}{y_{st}} \quad y_{st} = \frac{F_m}{k}. \quad (6.5.2.1)$$

Постоје три режима оптерећења структуре: квазистатички, импулсни и динамички.

Квазистатички режим. Размотримо случај у коме је време трајања оптерећења T значајно веће од сопственог периода осциловања структуре T_s . Овај услов се најчешће квантификује у облику $\omega T \geq 40$.

Максимално померање је достигнуто у тренутку t_m , пре него што је дошло до значајног пада оптерећења, па је $t_m < T$.

За велике вредности ω и T , фактор динамичког оптерећења има следећи облик:

$$f_{ks} = \left(\frac{y_m}{y_{st}} \right)_{ks} = 2. \quad (6.5.2.2)$$

Максимално померање структуре у овом режиму оптерећења зависи само од статичког померања y_m , максималне силе F_m и крутости структуре k . Време трајања оптерећења T , не утиче на највећи уби́г структуре. [1]

Импулсни режим. Ако је време трајања оптерећења T знатно мање од периода осцилације структуре T_s , односно ако је задовољен услов $\omega T \leq 0.4$, говоримо о импулсном оптерећењу. При оваквом оптерећењу, спољашна сила завршава деловање пре него што дође до значајног померања структуре. Време t_m које одговара максималном померању сада је веће од дужине трајања оптерећења T . Тренутак остваривања максималног померања одређен је са:

$$t_m = \frac{\pi - \theta}{\omega}, \quad (6.5.2.3)$$

где је параметар θ одређен релацијом:

$$\tan \theta = \frac{1 - \cos \omega T}{\omega T - \sin \omega T}. \quad (6.5.2.4)$$

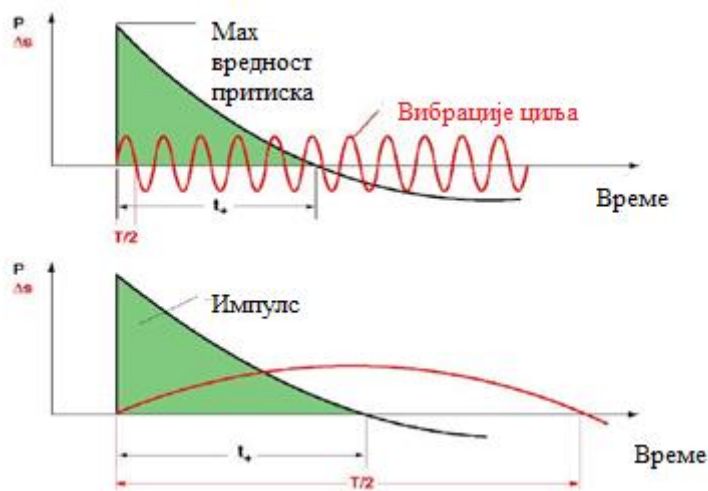
Динамички фактор оптерећења сада има вредности:

$$f = \frac{1}{\omega T} [\sin \theta - \sin(\theta + \omega T)] + \cos \theta. \quad (6.5.2.5)$$

Динамички фактор оптерећења у импулсном режиму, при малим вредностима ωT има вредност: [1]

$$f_{imp} = \left(\frac{y_m}{y_{st}} \right)_{imp} = \frac{\omega T}{2}. \quad (6.5.2.6)$$

На слици 32 је приказано време трајања позитивне фазе оптерећења и период сопствених осцилација структуре при квазистатичком и импулсном оптерећењу.



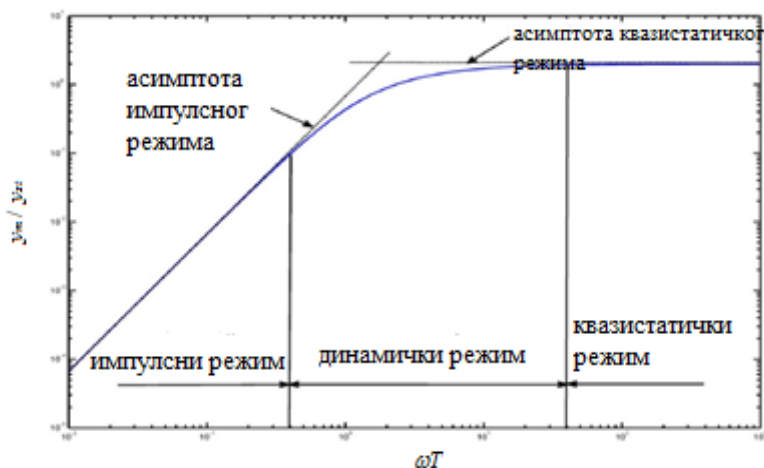
Слика 32: Време трајања позитивне фазе оптерећења и период сопствених осцилација структуре: а) квазистатичко оптерећење, б) импулсно оптерећење [1]

Динамички режим. У прелазној области у којој су време трајања оптерећења и период сопствених осцилација структуре истог реда величина, важи следеће $0.4 \leq \omega T \leq 40$, тада имамо динамички режим оптерећења.

За разлику од претходна два асимптотска режима, у овом случају није једноставно одредити динамички фактор оптерећења, јер он зависи и од силе и од импулса силе и постоји у одговарајућим доменима.

За фиксирана својства структуре, односно непроменљиву вредност њених карактеристика, повећање трајања оптерећења T означава прелазак из импулсног, преко динамичког, па до квазистатичког оптерећења структуре. То повећање јасно доводи до повећања динамичког фактора оптерећења, односно максималног померања структуре са једним степеном слободе кретања. [1]

На слици 33 је приказана зависност динамичког фактора оптерећења од параметра ωT , као и одговарајући режими оптерећења структуре.



Слика 33: Зависност динамичког фактора оптерећења од параметра ωT , као и одговарајући режими оптерећења структуре [1]

На слици је представљен одговор структуре, односно њено померање у функцији времена за две вредности параметра ωT у динамичком режиму оптерећења. Уочавамо да је при већој вредности ωT структура достигла максимално померање и направила неколико осцилација за време трајања позитивне фазе оптерећења. За мању вредност ωT показује се да структура није достигла максимално померање док је деловао ударни талас. После престанка спољашњег оптерећења структура слободно осцилује, будући да је пригушење занемарено. Реално постојање пригушења доводи до извесног смањења максималног померања, а затим до пригушених осцилација система. У том смислу, размотрени приступ (без пригушења) даје конзервативну оцену највећег померања, односно сигурности структуре. [1]

6.5.3 Криве једнаких оштећења

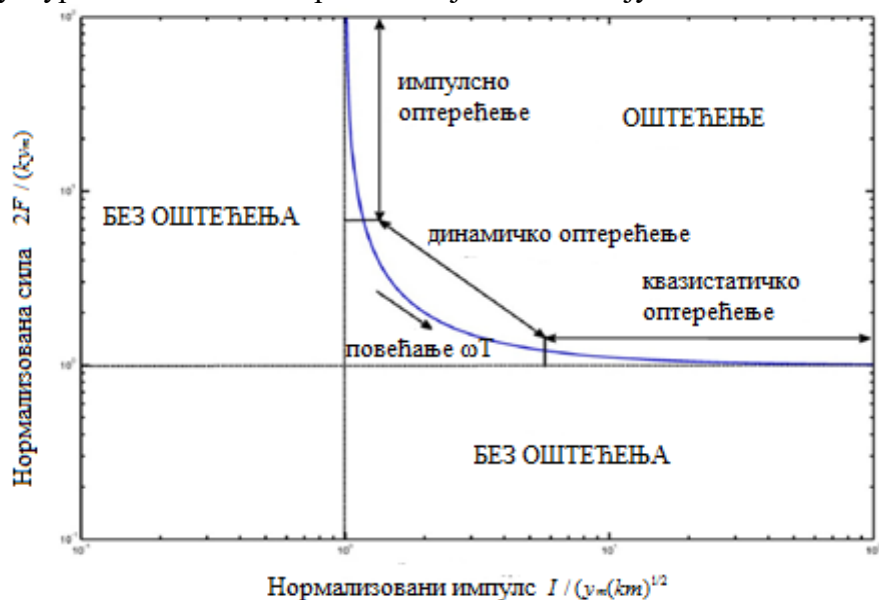
При анализи структуре под дејством динамичког оптерећења изазваног ударним таласом, најзначајнији резултат представља максимално померање y_m . Померање y_m је повезано са деформацијом и оштећењем структуре, те може представљати одређену критичну вредност за лом, оштећење, почетак пластичних деформација, итд.

Оптерећење $F(t)$ је дефинисано са два параметра: максималном силом F_m и временом њеног трајања T . Сматрамо да су маса структуре m и њена крутост k познате, чиме је одређена и сопствена учестаност ω . Ако усвојимо одређено критично померање y_m , тада се на основу претходних разматрања могу увести бездимензионе вредности силе, односно импулса: [1]

$$\bar{F}_m = \frac{2F_m}{ky_m} \quad (6.5.3.1)$$

$$\bar{I} = \frac{I\omega}{ky_m} = \frac{I}{y_m\sqrt{km}}$$

На слици 34 је приказана крива једнаких померања у $P-I$ дијаграму која раздваја зону оштећења структуре од области оптерећења која не изазивају оштећења.



Слика 34: Крива једнаких померања у $P-I$ дијаграму раздваја зону оштећења структуре од области оптерећења која не изазивају оштећења [1]

Померање структуре је уско повезано са њеним оштећењем, тако да се ова зависност назива и крива једнаких оштећења или крива изо – оштећења. Дијаграм у коме је дефинисана крива изо – оштећења се назива притисак – импулс или $P - I$ дијаграм. [1]

6.5.4 Деловање спољашње експлозије на структуру

Зависно од места експлозије, ударни талас који представља последицу експлозије може да оптерети одређену структуру споља или изнутра.

Тип одговора структуре зависи од величине структуре, њеног растојања од центра експлозије, трајања ударног таласа, итд.

Оптерећење дифракционог типа подразумева снажан раван ударни талас који делује на масивну структуру великих димензија. Цела структура је изложена ударном таласу и дејству натпритиска. Друга могућност се односи на исти ударни талас који делује на покретну структуру малих димензија изазивајући оптерећење аеродинамичког типа. Ударни талас поново обухвата целу структуру, али главна оштећења настају као последица трансляторног кретања структуре услед снажног оптерећења. Трећи тип оптерећења је локално оптерећење које се односи на случај мањег експлозивног пуњења и слабијег ударног таласа који делује на структуру великих димензија.

Размотримо дифракциони тип оптерећења за случај структуре облика паралелопипеда. Уочавамо три површине структуре на које делују различити натпритисци: предњу, горњу и задњу површину.

Меродавни натпритисак се одређује из следеће релације:

$$P(t) = p + c_D q, \quad (6.5.4.1)$$

где су:

p - одговарајућа вредност статичког натпритиска,

q - динамички притисак,

c_D - коефицијент оптора.

Сила која делује на разматрани део структуре одређена је са:

$$F(t) = P(t)A, \quad (6.5.4.2)$$

где је A одговарајућа површина. [1]

Оптерећење предње површине. Натпритисак који делује на предњу површину је у ствари рефлектовани натпритисак p_r . Овај притисак опада услед дифракције ударног таласа на горњој и бочним површинама. Ово смањење притиска се наставља док се не дође до вредности стагнационог притиска који је једнак збиру статичког натпритиска и динамичког притиска: [1]

$$p_{stag}(t) = p_m(t) + q(t). \quad (6.5.4.3)$$

Оптерећења горње и бочних површина. Меродавни натпритисак за ове површине се одређује преко исте релације као и меродавни натпритисак за оптерећење предње површине. У овом случају у питању је потпритисак. Смањење статичког натпритиска последица је сложеног вртложног струјања на пресеку предње и горње површине. [1]

Оптерећење задње површине. Ово оптерећење одређује се слично оптерећењу горњих и бочних површина. Најпре имамо раст натпритиска, што је последица коначног времена које је потребно ударном таласу да дође до центра задње површине, чиме се завршава процес дифракције. Динамички притисак поново доводи до креирања парцијалног вакуума. [1]

6.5.5 Деловање ударног таласа на човека

Могу се идентификовати четири типа повреда код човека које настају приликом дејства ударног таласа: примарне, секундарне, терцијарне и кватерне повреде.

Примарне повреде. Ове повреде су директна последица дејства натпритиска, односно одговарајућег импулса. Настају одмах по наиласку ударног таласа, а њихов степен зависи од положаја човека у односу на ударни талас. Најозбиљније повреде су везане за делове тела које карактеришу велике разлике густина суседних ткива (плућа, грло, дисајни путеви,...).

Секундарне повреде. Овај тип повреде је последица удара и пенетрације пројектила који су формирани услед експлозије.

Терцијарне повреде. Ова категорија повреда представља индиректну последицу рушећег дејства. Ударни талас може изазвати померање и убрзавање целог тела, што за последицу има пад. Све ударне брзине тела веће од $3m/s$ су потенцијално опасне. Ударне брзине реда $40m/s$ су смртоносне, без обзира на део тела којим се прво остварује контакт са препреком.

Кватерне повреде. У ову групу повреда сврставају се све могуће последице рушећег дејства које не припадају некој од три претходно поменуте категорије (опекотине, тровање гасовима, ...). [1]

6.6 Рушеће дејство при детонацији у тлу

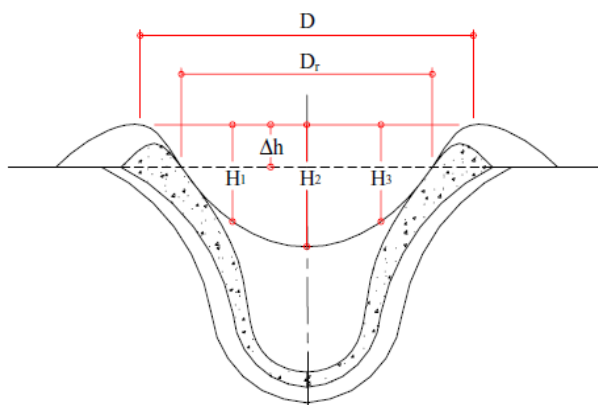
6.6.1 Формирање кратера

У случају површинских експлозија, као и експлозија изнад површине тла долази до преноса дела енергија садржане у продуктима детонације на подлогу. Код површинских експлозија утврђено је да се око $1/3$ енергије пренесе на тло. У овим случајевима долази до деформисања тла, али је оно неупоредиво мање него у случају подземних експлозија, када се у тлу формира рупа, коју називамо кратер.

Постоје три основна облика кратера:

- кугласти облик,
- равног дна са централним издизањем и
- равног дна са прстеновима. [10]

На слици 35 је приказан кратер са означеним параметрима.



Слика 35: *Кратер са означеним параметрима [10]*

После детонације на одређеној дубини долази до формирања шупљине у тлу коју испуњавају гасовити продукти детонације. Они се нагло шире и формирају, а истовремено се генерише ударни талас који се шири сферно. Бочно простирање таласа и његово кретање у дубину тла доводи до стварања натпритиска и импулса. Кретање ударног таласа ка површини тла изазива најпре избацивање земљишта. Талас разређења који се креће у супротном смеру, интерагује са гасовитим продуктима експлозије у шупљини чија се запремина повећава. То доводи до избацивања дела земљишта навише и стварања кратера. Део избаченог материјала под дејством гравитације може поново да падне у кратер.

Ако је центар експлозије на сувише великој дубини, продукти детонације немају довољно велику енергију да избаце велику масу тла изнад шупљине, па не долази до формирања кратера.

Растојање L_k центра експлозије од ивице конусног кратера представља једну од мера рушећег ефекта у тлу. Ово растојање се рачуна следећом формулом:

$$L_k = C_k \sqrt[3]{\frac{m_E}{K}}, \quad (6.6.1.1)$$

где су:

C_k - коефицијент који зависи од дубине експлозије и карактеристика тла,

m_E - маса експлозивног пуњења изражена преко ТНТ еквивалента,

K - коефицијент који зависи од природе тла. [1]

У табели 4 су представљене вредности коефицијента K у зависности од врсте тла.

Табела 4: *Вредности коефицијента K у зависности од врсте тла [1]*

Природа тла	K
Растресита земља	0.3 – 0.4
Набијена земља обложена облицима	0.5
Мешавина земље и шљунка	0.6
Стена, бетон	0.8

На слици 36 је приказана зависност коефицијента C од параметра $\sqrt[3]{\frac{m_E}{K}} / h$.

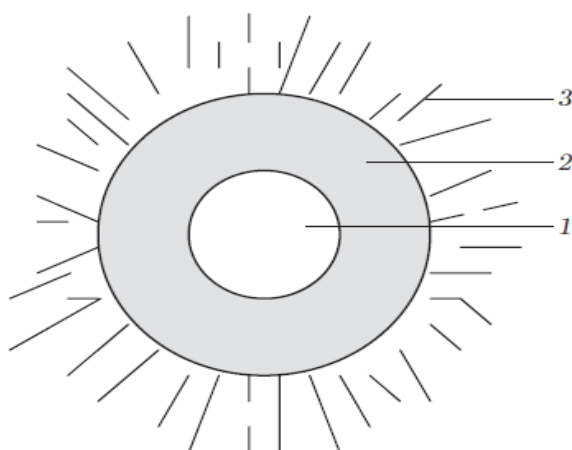


Слика 36: Зависност коефицијента C од параметра $\sqrt[3]{\frac{m_E}{K}} / h$ [1]

Однос дужине ивице кратера и дубине експлозије L_k/h одређује карактер кратера:

- ако је $L_k/h > 1.25$, у кратеру остаје мањи део разорене средине и резултат експлозије у тлу називамо отвореним кратером;
- ако је $L_k/h < 1.10$, кратер је формиран, али има мали угао конуса и испуњен је разореном средином, па кажемо да долази до формирања затвореног кратера;
- ако је $L_k/h < 1.0$, нема формирања кратера, дубина експлозије је превелика, те настаје само шупљина испуњена продуктима детонације, односно камуфлет.

На слици 37 је приказан дијаграм лома стене у затвореној експлозији. [7]

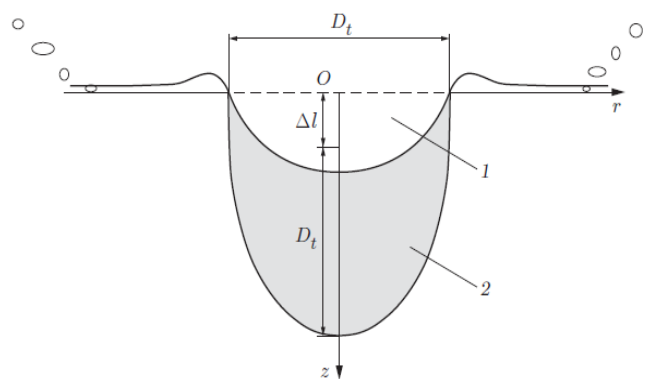


Слика 37: Дијаграм лома стене у затвореној експлозији, 1) шупљина камуфлета, 2) регија лома, 3) регија радијалних пукотина [7]

Однос L_k/h зависи од падног угла и дубине продирања пројектила у препреку пре него што дође до експлозије. Имајући у виду време успореног дејства упалача, могућа су два случаја:

- до експлозије долази након заустављања пројектила у препреци ($t_p < t_u$, где је t_p - време продирања пројектила у тло до заустављања, t_u -време успорења упалача),
- до експлозије долази у току продирања у препреку ($t_p > t_u$). [1]

На слици 38 је приказана конфигурација регије лома при удару. [7]



Слика 38: Конфигурација регије лома при удару: 1) пролазни кратер, 2) регија лома [7]

У пракси, други случај се јавља при поготку пројектила у препреку велике отпорности. Много се чешће дешава први случај.

Ако се претпостави да је кретање пројектила у фази продирања једнако успорено, онда се дужина продирања до истека времена t_u може одредити изразом:

$$l_u = v_0 t_u - \frac{v_0^2 t_u^2}{4l_p}, \quad (6.6.1.2)$$

где је v_0 - брзина пројектила при удару у тло.

Дубина на којој је дошло до експлозије одређује се преко релације: [1]

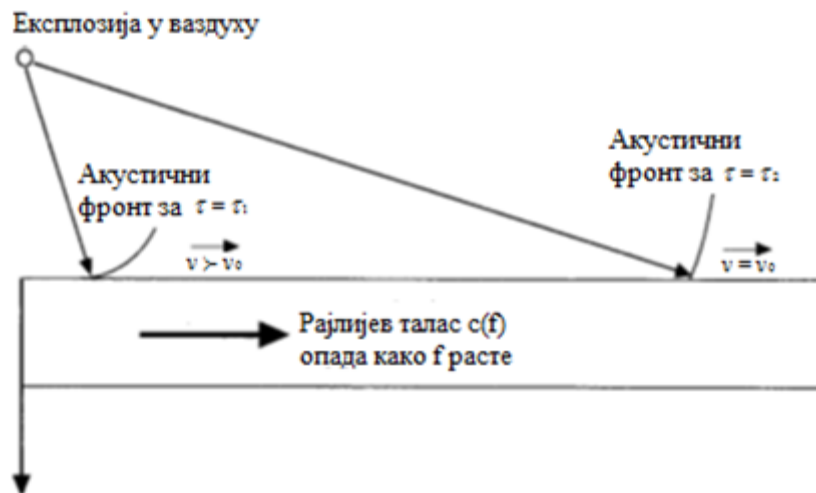
$$h = l_{pr} \cos \theta. \quad (6.6.1.3)$$

6.6.2 Сеизмичке компоненте површинских експлозија

Експлозивни извори детонирани близу Земљине површине могу проузроковати различите типове таласа, како у чврстом Земљиним тлу, тако и у атмосфери, што доводи до занимљивих процеса претварања енергије на интерфејсу између два медија. Нпр., акустични таласи који се крећу изнад површине могу ефикасно здружити енергију у ширење површинских таласа у земљи, под условом да постоји површинска таласна компонента која има фазну брзину једнаку акустичној фронталној брзини. Слично, сеизмички таласи могу

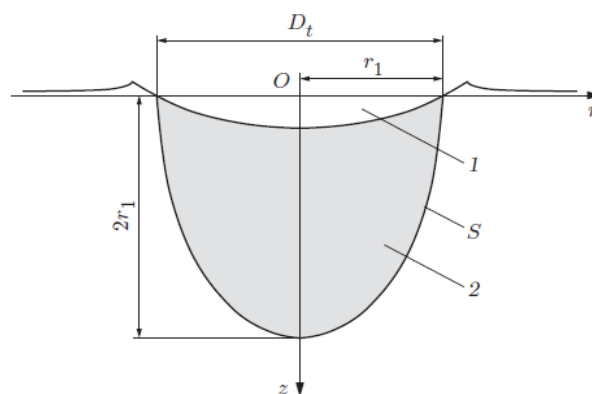
генерисати нехомогене звучне таласе изнад слободне површине у случајевима у којима је фазна брзина сеизмичких таласа једнака брзини звука у ваздуху. [12]

На слици 39 је приказан илустровани шематски дијаграм еволуције акустичног оптерећења на површини као функција удаљености од нулте земљине површине.



Слика 39: Илустровани шематски дијаграм еволуције акустичног оптерећења на површини као функција удаљености од нулте земљине површине [12]

На слици 40 је приказана конфигурација регије лома у контактної експлозији. [7]



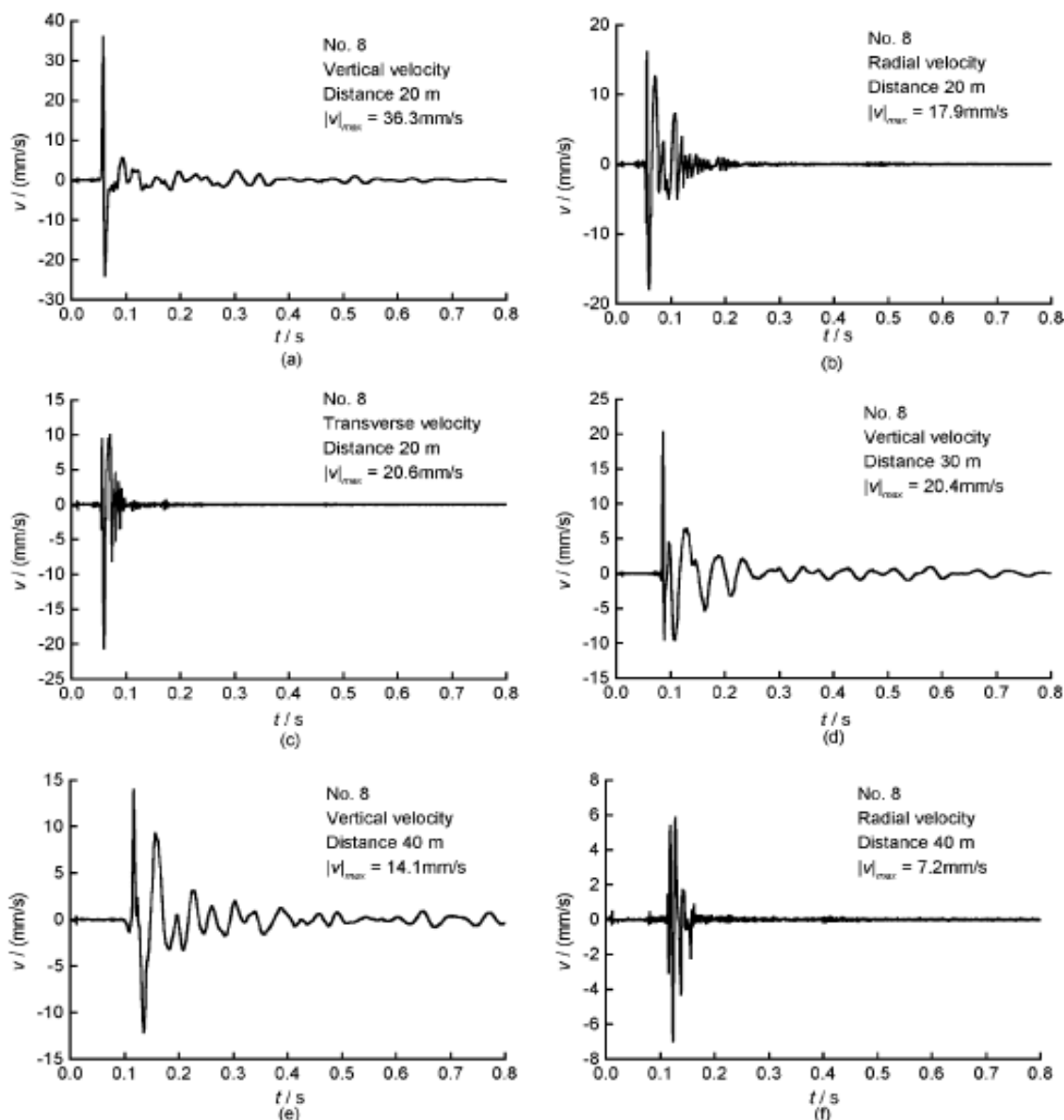
Слика 40: Конфигурација регије лома у контактної експлозији; 1) крајер, 2) регија лома [7]

Кинески научник Жанг је извршио експеримент на коме је показао како различити извори површинске експлозије утичу на сеизмичке компоненте и како се разликује штета настала од дејства ударног таласа. Користио је два извора експлозије. У првој групи штета настала дејством ударног таласа је била знатно већа док је у другој групи штета била мања.

Експлозивни извори су постављени да висе у ваздуху на висини од $0.5m$ од земљине површине. Симулационе мете (челичне боце) су постављене на раздаљину од $0.4m$ од центра експлозије. Натпритисак од $0.1 MPa$ је био довољан да направи трансформацију

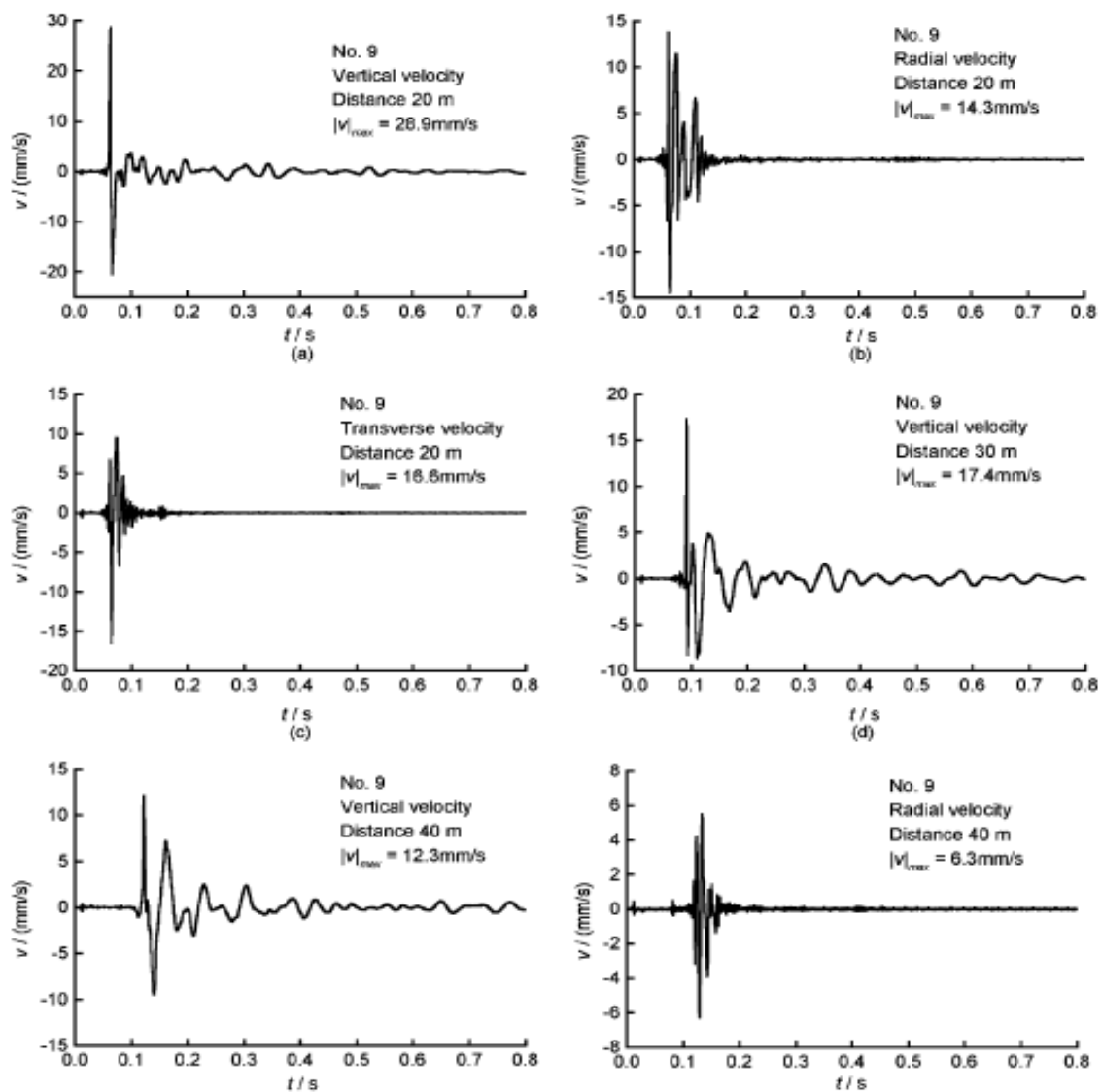
симулационих мета. Сеизмички сензори су такође постављени у непосредној близини. Њихов задатак је мерење вертикалне и хоризонталне компоненте сеизмичких таласа из оба експлозивна извора. У моменту када се сеизмички талас нађе између пријемника сензора могуће је измерити сеизмичку брзину. Максимална раздаљина на којој је ударни талас направио штету износи $4.6m$ у првој групи и $4.07m$ у другој групи. Показао је да под оваквим условима експеримента, највећа раздаљина на којој ударни талас може направити штету приликом површинске експлозије износи $40m$ од центра експлозије. [14]

На слици 41 су приказане сеизмичке компоненте површинске експлозије изазване експлозивним изворима из прве групе.



Слика 41: Сеизмичке компоненте површинске експлозије изазване експлозивним изворима из прве групе [14]

На слици 42 су приказане сеизмичке компоненте површинске експлозије изазване експлозивним изворима из друге групе.



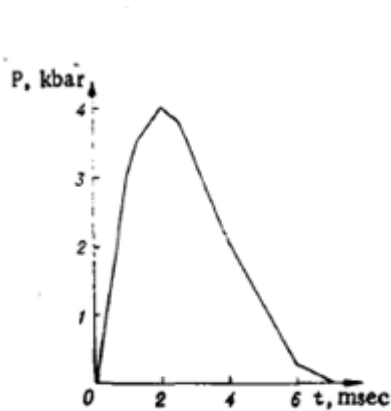
Слика 42: Сеизмичке компоненте површинске експлозије изазване експлозивним изворима из друге групе [14]

6.6.3 Сеизмичке компонентне подземних експлозија

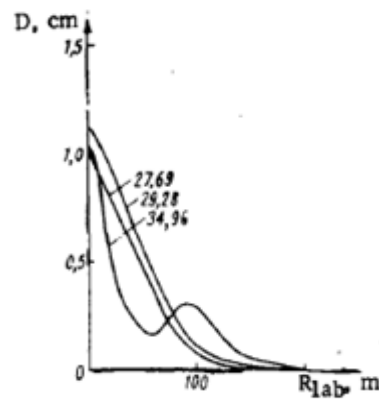
У циљу заштите подземних структура и радова од штетних ефеката подземних експлозија, развијена је метода којом се одређују сеизмичке карактеристике подземних експлозија. Испитано је понашање тела услед дејства импулсних ефеката коришћењем нумеричких метода, које представљају даљи развој методе коначних разлика, базираних на замени диференцијалних једначина. За осу симетрије, проблем експлозије сферичног пуњења ТНТ - а, са енергијом $W=0.1kT$ у бесконачном полупростору је присуство прореза испод пуњења.

Будући да је задатак импулса на сферичној површини (радијуса R_0) симулариње пуњења и да је базирано на експерименталним подацима, не можемо са сигурношћу дефинисати пластичне деформације, али варирајући напон σ_T у границама од 0 до σ_{max} (где је σ_{max} импулсна амплитуда) можемо испитати широк спектар промена напона. [4]

На слици 43 је приказан апроксимативни импулс који доводи до унутрашње теоријске границе и формирање површинског таласа у еластичном медијуму.



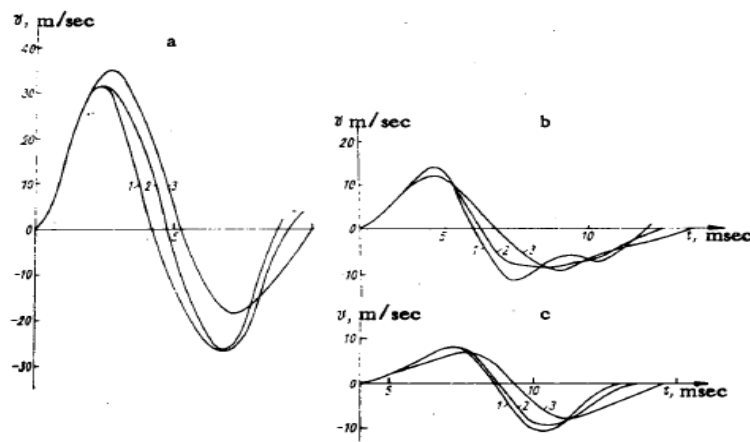
Слика 1



Слика 2

Слика 43: а) апроксимативни импулс који доводи до унутрашње теоријске границе, б) формирање површинског таласа у еластичном медијуму [4]

На слици 44 је приказана варијација брзине са временом у односу на различите радијусе сферичног пуњења.



Слика 44: Варијација брзина у односу на време; а) дистанца од центра пуњења $R=18m$, б) $R=30m$, в) $R=43m$ [4]

Почетни радијус $R=18m$ је узет као вредност од које почиње прорачун у нееластичној зони, избегавајући испитивања у прелазној зони. Коришћење овог метода омогућава нам да израчунамо ширење површинског таласа (Rayleighvog таласа). Варијација брзине са временом, зависно од различитих радијуса, открива изражену зависност од форме сигнала. [4]

Начин на који се еластични талас трансформише у сеизмички талас је следећи: енергија експлозије се преноси до околног медијума путем компресионог таласа који замењује

одређену запремину која је пропорционална енергији експлозије у еластичној регији изван лимита демолирајуће зоне. Линерна димензија ове зоне зависи од особина медијума, конкретно од компресије и снаге. За експлозију у земљи, радијус демолирајуће зоне је приближно:

$$R = 100q^{1/3}, \quad (6.6.3.1)$$

где је q - ТНТ еквивалент. [5]

Време радијалног померања честица током експлозије у еластичном таласу, којег одређује фреквенција сигнала, је приближно једнако дијаметру демолирајуће зоне подељеним са брзином лонгитудиналних таласа.

Будући да брзина еластичних таласа расте са дубином, таласи на већим дистанцама се шире дуж криволинијских зрака. Ови зраци настају услед експлозије и формирају велике углове са површином, тако да су параметри лонгитудиналних сеизмичких таласа одређени еластичним таласима формираним иза експлозије. Приликом експлозије на површини, амплитуде компресионог и лонгитудиналног сеизмичког таласа опадају са опадањем дубине експлозије.

Уколико је подземна експлозија довољно близу површине, тако да се формирао кратер, појављују се силе које делују на еластични полупростор. Током подземне експлозије, приликом избацивања земље и формирања кратера генеришу се кохезионе и фрикционе силе на нискофреквентним таласима. На одређено време, маса земље избачена услед експлозије је уклоњена из еластичног полупростора и ово генерише еластични талас који је близу осе симетрије, испод експлозије и који је заправо лонгитудинални талас. [5]

Ако претпоставимо да је запремина земље избачене експлозијом садржана у обрнутом конусу са врхом постављеним у центар експлозије и радијусом који је једнак дубини експлозије и да је симултано одвојена из масива, ефекат на еластични полупростор може се представити као сила F , која се може изразити у следећем облику:

$$F = g\rho w^3, \quad (6.6.3.2)$$

где су:

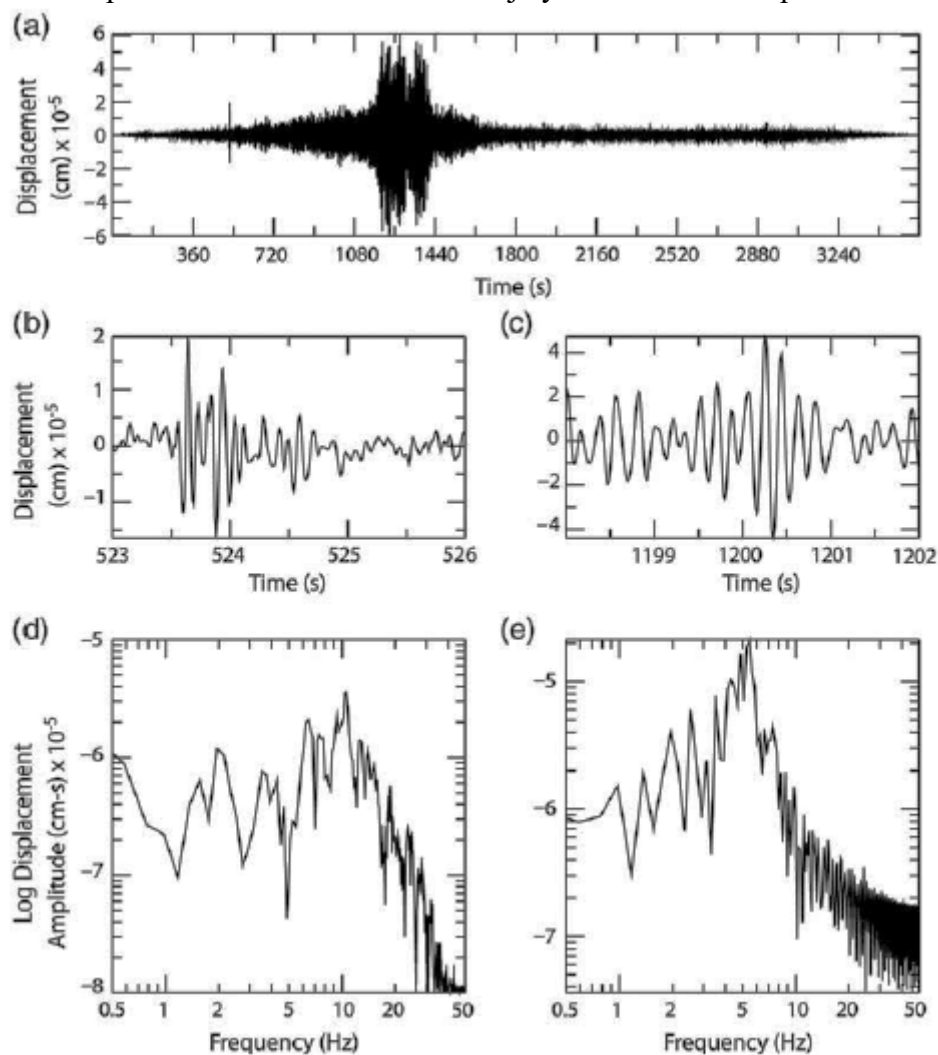
g - гравитациона константа,

ρ - густина земље,

w - запремина конуса.

Сила F расте са повећањем дубине експлозије. Овај раст престаје када експлозије није довољно снажна да одвоји земљу из масива (формира кратер). Сматра се да је експлозија на дубини која је једнака радијусу експлозије даје највећу амплитуду таласа. [5]

На слици 45 су приказане вертикалне осцилације сеизмичких компонената земљишта приликом подземних експлозија у зависности од времена.



Слика 45: Вертикалне сеизмичке компоненте земљишта приликом подземне експлозије [11]

6.6.4 Одређивање параметара ударног таласа

Подземна експлозија изазива снажно померање и притисак у околном тлу, што доводи до формирања таласа напона у тлу. Притисак изазива компресиони талас, код кога се честице земљишта померају у правцу простирања таласа. Јавља се и смицајни талас који изазива кретање делића земљишта у правцу нормалном на правац кретања таласа. Јавља се и површински талас који карактерише елиптично кретање честица.

Амплитуда компресионог и смицајног таласа је обрнуто пропорционална квадратном корену растојања. Компресиони и смицајни таласи доминирају на мањим растојањима, али слабе врло брзо док површински таласи доминирају на већим растојањима од центра експлозије.

Брзина простирања површинских и смицајних таласа износи:

$$c_R \approx c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}, \quad (6.6.4.1)$$

док је брзина кретања компресионог таласа:

$$c_p = \sqrt{\frac{K}{\rho}}. \quad (6.6.4.2)$$

Појам сеизмичке брзине дефинише се на следећи начин:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (6.6.4.3)$$

У претходним изразима ρ је густина тла, G , K и E су редом: модул смицања, запремински модул еластичности и Јунгов модул еластичности тла.

Разлози за опадање енергије и амплитуде ових таласа са повећањем растојања од центра експлозије су повећање сферне површине фронта таласа и дисипација енергије на пластично деформисање тла.

Поремећај који у земљишту изазива компресиони талас описује се путем два параметра: највеће померање x и највећа брзина u честице тла. Основни задатак је да се ови параметри преведу у максимални натпритисак и импулс натпритиска, а те релације имају облик:

$$p_m = \rho c_p u \quad I = \rho c_p x. \quad (6.6.4.4)$$

Веза између брзина честица и њеног померања је:

$$u = \omega x = 2\pi f x, \quad (6.6.4.5)$$

фреквенција је одређена изразом:

$$f = \frac{u}{2\pi x}, \quad (6.6.4.6)$$

док је таласна дужина одређена изразом: [1]

$$\lambda = \frac{2\pi c x}{u}. \quad (6.6.4.7)$$

6.7 Подводне експлозије

Поред ваздуха и тла, вода представља трећу средину у којој може да дође до експлозије. Подводна детонација кондензованог бризантног експлозива за резултат има два импулса притиска: притисак у мехуру који формирају гасовити продукти детонације и који је специфичан за подводне експлозије и ударни талас који се простире кроз воду. [1]

Гасни мехур. Иницијални мехур у води на дубини експлозије формирају врели продукти детонације. Овај мехур испољава карактеристичне пулсације, односно радијус мехура осцилује. Услед притиска гасова, мехур се брзо шири и потискује околну воду. [1]

На слици 46 је приказана зависност притиска од времена при подводној експлозији.



Слика 46: Зависност притиска од времена при подводној експлозији: ударни талас и осцилације притиска у мехуру [1]

Услед инерције воде и гасова, ширење гасовитих продуката детонације се наставља и након достизања равнотежног притиска, што доводи до сажимања мехура и сабијања гасовитих продуката детонације. Инерција условљава да притисак у мехуру постане већи од равнотежног, што доводи до новог циклуса експанзије гасова и ширења мехура. Све осцилације радијуса мехура су пригушене. [1]

Ударни талас у води. Укупна енергија ослобођена експлозијом распоређује се приближно једнако на ударни талас који се простире у води и импулс мехура. Ударни талас карактерише релативно висок натпритисак и кратко време трајања оптерећења, док кретање воде услед ширења мехура карактерише знатно мањи притисак, али и дуже трајање оптерећења. Од великог значаја је интеракција ударног таласа са препрекама или слободним површинама. Интеракција ударног таласа са чврстим дном доводи до рефлексије и појачавања, док при наиласку ударног таласа на слободну површину воде долази до формирања таласа разређења и слабљења ударног таласа. [1]

Два шведска физичара су извршила тестирање и анализу дисперзије површинских таласа кратког периода и анализу буке кроз линеарне сеизмичке низове користећи експлозив ТНТ. Експеримент је следећи: употребљен је експлозив ТНТ масе од 0.2 - 2.9 тона, који су активирали у води дубине између 3 - 34m. Опрема којом су снимани ударни таласи је MARS 66 – аналогни систем за снимање са 3 канала. Просечна дужина између станица за снимање током два експеримента је била око 3.5km. Снимања су вршена током ноћи да би се избегла непотребна бука.

Током експеримента јасно је уочена дисперзија површинских таласа. Посебно су посматрана два површинска таласа ниске фреквенције који су се појавили у близини места за снимање. Посматрано време кашњења између два таласа је било између 0.7 - 1.4s, зависно од дубине

воде. Други талас је изазван водом која се пореметила услед дејства експлозива, па је стога тај ефекат и назван „мехурски ефекат“. Поменути „мехурски ефекат“ је постигнут коришћењем 2.9 тона ТНТ који је активиран са дубине од 30m. Метод коришћења две станице за снимање података даје прилично тачне резултате. Користећи сва средства, сет прелиминарних дисперзионих кривина је израчунат на дистанци између два пријемника која износи између 10km и 20km. Сличне дисперзионе криве су груписане у географске регионе (дисперзионе регионе), а дистанце између два пријемника су продужене користећи просечну дисперзију. Таква комбинација података је названа метод једнаких интервала.

Дисперзиона регија је била хомогена током периода од 1s. Дисперзиона крива високог периода се може спојити са претходно поменутом дисперзионом кривом која је хомогена у интервалу од 1s.

Дисперзионе криве средњег и кратког периода се спајају континуално у интервалу од 0.6 – 0.7s. Све дисперзионе криве које се јављају на дистанци од око 80km од станице снимања формирају дисперзиону регију. Примећено је да је дисперзија линарна за све регије на интервалу од 1 – 3 Hz. У овом експерименту дисперзија је откривена и описана користећи једноставне методе. Није употребљен компликовани дигитални сигнал нити операције филтрирања.

Површински таласи кратког периода могу дати прилично тачне резултате које би било тешко добити другим методама. [3]

6.7.1 Сеизмичке компоненте подводних експлозија

Време трајања ударног таласа приликом експлозије у близини слободне површине рачуна се према следећем обрасцу: [8]

$$\tau_0 = \frac{2hH}{cR}, \quad (6.7.1.1)$$

где су:

h - дубина сонде,

H – дубина воде на којој се десила експлозија,

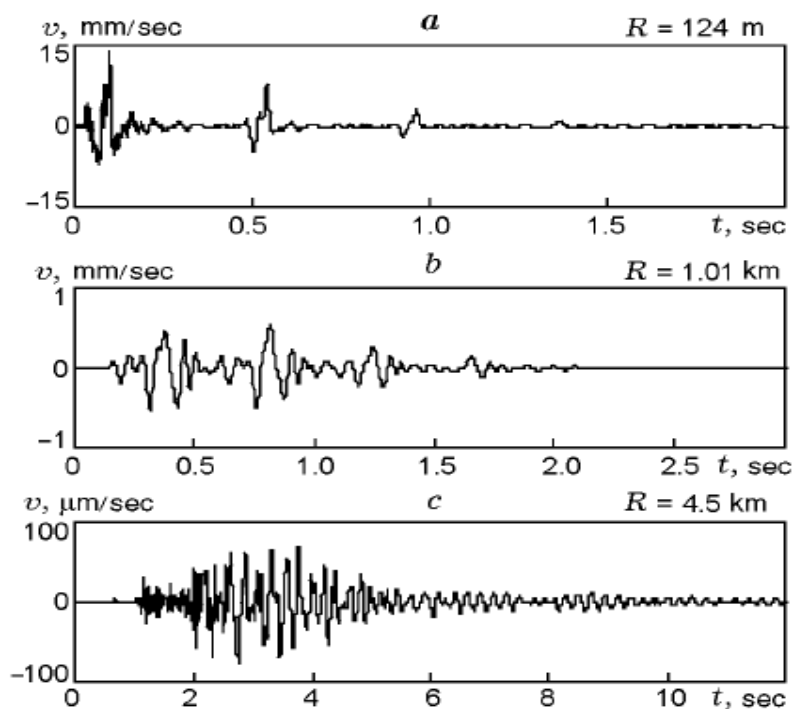
c – брзина звука у води,

R – радијус од центра експлозије.

Утврђено је да време трајања ударног таласа опада са повећањем радијуса од епицентра експлозије, док расте са са дубином на којој се десила експлозија. Уколико је вредност углова упадања таласа на водену површину мала, а фронт нормалан на површину, тада талас преузима фронт и притисак може значајно опасти са повећањем раздаљине.

Приликом деловања ударног таласа стварају се три сеизмичке компоненте осцилаторног кретања земљишта: вертикална и две хоризонталне (правац север – југ и исток – запад).

На слици 47 су приказане вертикалне осцилације земљишта које су проузроковане експлозијом 52kg експлозива на различитим удаљеностима од епицентра.



Слика 47: Вертикалне осцилације земљишта које су проузроковане експлозијом 52kg експлозива на различитим удаљеностима од епицентра [8]

На примеру *a* су приказане вертикалне осцилације најближе епицентру експлозије. Временски интервал између импулса проузрокованих осцилацијама мехурића гаса се поклапа са периодом осцилације мехурића гаса.

На примеру *b* су приказане вертикалне осцилације земљишта на раздаљини 1.01km од епицентра експлозије. Видљиви су таласни облици који се поклапају са периодом осцилације мехурића гаса.

На примеру *c* су приказане вертикалне осцилације земљишта на раздаљини од 4.5km од епицентра експлозије. Амплитуда осцилација износи неколико стотина микрометара по секунди. Због дисперзије и апсорпције високо фреквентних компонената осцилације, видљиви период осцилације и његово трајање расте.

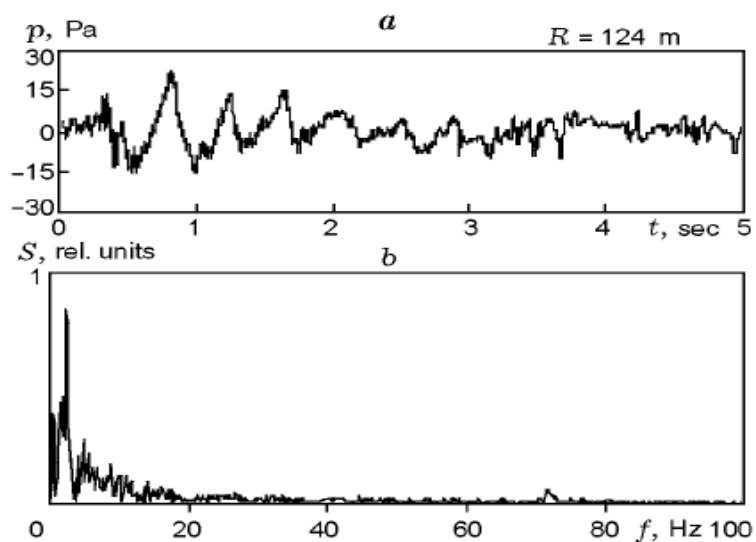
Сеизмичка ефикасност подводних експлозија је знатно већа у односу на сеизмичку ефикасност подземних експлозија. [8]

Ваздушни таласи подводних експлозија су проузроковани кретањем водене површине у епицентру експлозије. Таласи имају четири фазе:

- талас правца који резултује рефракцијом експлозивног компресионог таласа од земљишта до ваздуха;
- ослобађање гасова у атмосферу побуђује две кратке фазе са позитивним поларитетом;
- формирање шупљине побуђује дуготрајну фазу у форми негативне полу – синусоиде;
- секундарна експанзија шупљине побуђује дуготрајну фазу у форми позитивне полу – синусоиде. [8]

Прва фаза опада са опадањем дубине пуњења експлозива, док преостале фазе опадају са дубином много брже. У случају камуфлета, без формираног кратера, све фазе су безначајне, изузев прве. [8]

На слици 48 је приказан акустични сигнал приликом експлозије 52kg експлозива.



Слика 48: Акустични сигнал приликом експлозије 52kg експлозива [8]

7 ЗАКЉУЧАК

У овом раду имали смо прилике да се детаљно упознамо са појмом експлозије и детонације. Поглавља су формирана према хронолошком редоследу везано за настанак и деловање експлозије и контактне детонације. Обрађене су експлозивне материје, њихова основна својства, као и најчешће коришћене врсте. Приказани су услови за пробијање препрека од различитог материјала, различите густине и дебљине. Акценат је стављен на рушеће дејство пројектила настало натпритиском ударног таласа. Приказани су математички модели параметара ударног таласа, правац и интензитет таласа, као и деловање спољашње експлозије на структуру и на човека. Објашњен је начин настанка кратера или камуфлета, зависно од услова подземне експлозије, као и подводне експлозије, сеизмичке компонентне подводних експлозија и простирање ударног таласа у води.

Тиме је комплетирано простирање ударног таласа на површини земље, у земљи и у води.

Добијени резултати ће бити искоришћени у циљу набављања сеизмичких сензора који ће мерити вибрације приликом удара пројектила у тло. Сензор је уређај који мери физички квантитет (притисак, акустика, вибрације, итд.) и конвертује га у сигнал којег може читавати човек или инструмент. Овакав начин мерења сеизмичких вибрација ће омогућити прецизно одређивање падне тачке пројектила помоћу сензора.

Систем одређивања падне тачке је замишљен на следећи начин:

- након удара пројектила у тло настају вибрације земљишта које бележи одговарајући сеизмички сензор;
- после измерених вертикалних и хоризонталних сеизмичких компоненти, сензор преко микроконтролера шаље податке на рачунар (PC);
- веза између микроконтролера и рачунара (PC) се остварује преко одговарајућих серијских протокола (RS232, RS444, RS485, SPI, CAN, I²C и други).

Комерцијални сензори који својим карактеристика највише одговарају за овакав вид испитивања су инерцијални MEMC сензори који такође своју најширу примену налазе у војној индустрији. Најпознатији MEMC сензор који се користи у војној индустрији је SiIMU02, познатији као IMU02.

Овакав начин примене сензора ће унапредити квалитет спољнобалистичких испитивања средстава наоружања и војне опреме (НВО) у Војсци Србије. Спољнобалистичка испитивања НВО спроводи Технички опитни центар (ТОЦ) у Београду, који за овај сегмент испитивања користи осматраче који су позиционирани на тактички постављеним осматрачницама и који се за овај вид посла ослањају на познавање терена и искуство. Јединица ТОЦ – а задужена за извршење спољнобалистичких и интерно – конструкторских испитивања је полигон за испитивање наоружања и војне опреме у Никинцима (ЦиНВО Никинци).

8 ЛИТЕРАТУРА

- [1] Балистика на циљу, *П.Елек*, Машински факултет Универзитета у Београду, 2018.
- [2] Физика експлозивних процеса, Handout са предавања, *С. Јарамаз*, Машински факултет Универзитета у Београду, 2016.
- [3] Explosion – generated short period surface wave dispersion and noise studies along linear seismic arrays in southern Sweden, *Kjell Astrom and Carl Erik Lund*, Department of Geophysics, University of Uppsala, 1992.
- [4] An investigation of the seismic characteristics of an underground explosion by the finite – difference method, *V.V. Zhukov and V.F. Kotenko*, Mining Institute, Apatity, 1975.
- [5] Excitation of low – frequency seismic body waves in an underground explosion, *V.N. Rodionov*, Translated from Zhurnal Prikladnoi Mekhaniki i Tekhnicheskoi Fiziki, No. 5, pp. 153-155, Moscow, 1982.
- [6] Transition from the Sedov - Taylor blast wave solution up to the sound wave, *C. De Izarra, J. Caillard and O. Vallee*, Faculty of Sciences, University d’Orleans, 2002.
- [7] Seismic efficiency of a contact explosion and a high – velocity impact, *N.I. Shishkin*, Institute of Technical Physics, Snezhinsk, 2007.
- [8] Seismic, hydroacoustic and acoustic action of underwater explosions, *A.V. Adushkin, V.N. Burchik, A.I. Goncharov, V.I. Kulikov, B. D. Khristoforov and V. I. Tsykanovskii*, Russian Academy of Science in Moscow, 2004.
- [9] The shape of the blast wave: Studies of the Friedlander equation, *John M. Dewey*, Department of Physics and Astronomy, University of Victoria, 2003.
- [10] Size of craters produced by explosive charges on or above the ground surface, *R.D. Ambrosini, B.M. Luccioni, R. F. Danesi, J.D. Riera and M.M. Rocha*, National University of Tucuman, Argentina, 2002.
- [11] Evaluation of the seismic effect of an underground explosion, *A.S. Bykovtsev and D.B. Kramarovskii*, Translated from Prikladnaya Mekhanika i Tekhnicheskaya Fizika, No. 6, pp. 3 - 11, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics, Vol.35, No.6, Tashkent, 1994.
- [12] An analysis of seismic and acoustic signals measured from a series of atmospheric and near – surface explosions, *I.O. Kitov, J.R. Murphy, O. P. Kusnetsov, N. I. Nedoshivin and B.W. Barker*, Russian Academy of Sciences, 1997.
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/Chapman%E2%80%93Jouguet_condition
- [14] Correlations of blast damage to ground surface targets with explosion seismic effect, *Qi Zhang*, Beijing Institute of Technology, China, 2004.