

УНИВЕРЗИТЕТ ОДБРАНЕ У БЕОГРАДУ

ВОЈНА АКАДЕМИЈА

Катедра војнохемијског инжењерства



М А С Т Е Р Р А Д

**ТЕМА: Истраживање могућности примене експлозивом
генерисане плазме за уништавање УБС**

МЕНТОР :

пуковник, ванредни професор,
др Зоран Бајић, дипл. инж.

СТУДЕНТ:

капетан прве класе
Петар Радовановић

Београд, фебруар 2026. године

УВОД	6
1. ЕКСПЛОЗИВОМ ГЕНЕРИСАНА ПЛАЗМА	8
1.1. Плазма као агрегатно стање и услови њеног постојања	8
1.1.1. Дебајева дужина	8
1.1.2. Критеријум плазмености	9
1.1.3. Дебајева дужина у експлозивом генерисаној плазми	9
1.2. Детонација као извор ЕГП	10
1.2.1. Детонација кондензованих експлозива и настанак ЕГП	10
1.2.2. Формирање плазме на слободној површини експлозива	11
1.2.3. Јонизациони таласи и њихов однос са ударним таласом	12
1.2.4. Колективни ефекти и кохезија у експлозивом генерисаној плазми	14
1.2.5. Електронска густина и плазмена фреквенција	15
1.2.6. Сударни процеси и релаксација у експлозивом генерисаној плазми	16
1.2.7. Електрична проводљивост експлозивом генерисане плазме	18
1.2.8. Магнетна поља и електромагнетни импулси у експлозивом генерисаној плазми	19
1.2.9. Просторна пропагација експлозивом генерисане плазме	20
1.2.10. Временске скале развоја експлозивом генерисане плазме	22
1.2.11. Температурни режими и неравнотежна природа експлозивом генерисане плазме	23
1.2.12. Интеракција експлозивом генерисане плазме са материјалима	24
1.2.13. Енергетски биланс експлозивом генерисане плазме и редови величина [4]	26
1.2.14. Ограничења и критични параметри примене експлозивом генерисане плазме	28
1.2.15. Рекомбинација и распад плазменог стања	29
2. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЕКСПЛОЗИВОМ ФОРМИРАНЕ ПЛАЗМЕ	32
2.1. Методе експерименталне дијагностике	32
2.2. Оптичка и спектроскопска карактеризација експлозивом генерисане плазме	33

2.3.	Електрична и електромагнетна карактеризација експлозивом генерисане плазме.....	34
2.4.	Просторна и временска структура експлозивом генерисане плазме...	36
2.4.1.	Геометрија и димензије пламене зоне	37
2.4.2.	Раздвајање плазме и ударног таласа.....	38
2.4.3.	Унутрашња просторна неуниформност	38
2.5.	Временска карактеризација и фазе развоја експлозивом генерисане плазме	38
2.5.1.	Фаза иницијалне јонизације	39
2.5.2.	Фаза кохерентног развоја и пропагације.....	39
2.5.3.	Фаза рекомбинације и распада.....	40
2.5.4.	Поређење временских скала са механичким процесима.....	40
2.6.	Температурна карактеризација и спектроскопске методе.....	40
2.6.1.	Појам ефективне температуре у неравнотежној плазми	41
2.6.2.	Оптичка емисиона спектроскопија као дијагностички алат	41
2.6.3.	Одређивање ротационе температуре.....	41
2.6.4.	Вибрациона и електронска температура.....	42
2.7.	Електронска густина, електрична проводљивост и електромагнетна својства	43
2.7.1.	Електронска густина као основни параметар плазме	43
2.7.2.	Плазмена фреквенција и електродинамичка реакција.....	43
2.7.3.	Дебајево екранирање и просторне последице	44
2.7.4.	Електрична проводљивост и Друдеов модел.....	44
2.7.5.	Електромагнетни импулси и магнетна поља.....	45
2.8.	Утицај околног медија и граничних услова на својства експлозивом генерисане плазме.....	45
2.8.1.	Утицај хемијског састава околног гаса	45
2.8.2.	Утицај притиска околног медија	46
2.8.3.	Геометрија и граничне површине.....	46
2.8.4.	Ограничења моделирања утицаја медија.....	47
2.9.	Синтеза карактеристичних параметара експлозивом генерисане плазме	48

2.9.1. Карактеристични параметри и редови величина	48
3. ИСТРАЖИВАЊА ЕКСПЛОЗИВОМ ФОРМИРАНЕ ПЛАЗМЕ	50
4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА	59
ЗАКЉУЧАК	63
СПИСАК КОРИШЋЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ	65
СПИСАК СЛИКА	67
СПИСАК ТАБЕЛА	69

УВОД

Неексплодирана убојна средства представљају један од најопаснијих заосталих проблема након оружаних сукоба. За разлику од непосредних разарања, последице присуства неексплодираних убојних средстава често се испољавају годинама или деценијама након завршетка конфликта, угрожавајући животе цивила, посебно деце, као и безбедност инфраструктуре и животне средине. Према доступним подацима, значајан број повреда и смртних исхода у постконфликтним подручјима директно је повезан са случајним активирањем заосталих експлозивних средстава.

Класичне методе уклањања и уништавања неексплодираних убојних средстава заснивају се пре свега на ручном уклањању, контролисаној детонацији или хемијској неутрализацији. Иако су ове методе у пракси широко примењене и развијене, оне често подразумевају висок степен ризика за људство које учествује у процесу, као и ограничену контролу над последицама дејства и поред свих предузетих мера опреза. Контролисана детонација, као најчешће примењив приступ, неминовно доводи до значајних механичких и акустичних ефеката, што може бити неприхватљиво у насељеним подручјима или у близини осетљивих објеката.

У том контексту, последњих деценија јавља се интересовање за примену физичких процеса који омогућавају локализовано и краткотрајно дејство, са потенцијалом да се експлозивна материја уништи или деградира без развоја класичне детонације. Један од таквих процеса је експлозивом генерисана плазма (ЕГП), која настаје као последица екстремних услова притиска и температуре током детонације кондензованих експлозива.

Експлозивом генерисана плазма представља специфично плазмено стање које се одликује изузетно кратким трајањем, нестабилношћу, високом електронском густином и снажним електромагнетним ефектима. Иако њен удео у укупном енергетском билансу експлозије остаје релативно мали, локална енергетска густина и временске скале процеса омогућавају појаву физичких ефеката који се не могу објаснити искључиво класичном гасном динамиком или термичким механизмима.

Истраживања експлозивом генерисане плазме дуго су била усмерена пре свега на разумевање њеног настанка и основних својстава. Међутим, савремени експериментални радови показују да је могуће остварити интеракцију између експлозивом генерисане плазме и експлозивних материја на начин који доводи до

њихове локалне деградације или чак прекида детонационог процеса, под строго контролисаним условима. Ови резултати отварају могућност разматрања примене експлозивом генерисане плазме као механизма за безбедно уништавање неексплодираних убојних средстава.

Циљ овог рада је да се, кроз систематичну анализу теоријских основа, карактеристика и релевантних истраживања експлозивом генерисане плазме, испита могућност њене примене у контексту безбедног уништавања неексплодираних убојних средстава. Посебна пажња посвећена је разумевању физичких механизма који стоје у основи настанка и дејства плазме, као и ограничењима која произилазе из њене краткотрајне и неравнотежне природе.

Структура рада организована је тако да након уводног разматрања следи приказ теоријских основа експлозивом генерисане плазме, затим детаљна карактеризација њених физичких својстава, критичка анализа постојећих истраживања и, коначно, синтеза закључака о дометима и ограничењима њене потенцијалне примене. На тај начин, рад настоји да пружи јасан и уравнотежен увид у могућности експлозивом генерисане плазме као физичког феномена од значаја за безбедност и заштиту људских живота.

1. ЕКСПЛОЗИВОМ ГЕНЕРИСАНА ПЛАЗМА

У овом поглављу разматрају се теоријске основе експлозивом генерисане плазме (ЕГП), са циљем да се феномен јасно дефинише, физички објасни и разграничити од сродних појава као што су ударни таласи, термална плазма и електрична пражњења. Посебан нагласак стављен је на просторне и временске скале, електронске и термодинамичке параметре, као и на ограничења класичних равнотежних модела у опису овог феномена. Ова анализа представља неопходну основу за разумевање карактеризације и истраживања експлозивом генерисане плазме која следе у наредним поглављима.

1.1. Плазма као агрегатно стање и услови њеног постојања

Плазма се дефинише као квази-неутрални систем наелектрисаних и неутралних честица који показује колективно понашање. За разлику од обичног гаса, у плазми постоји довољно велики број слободних носилаца наелектрисања (електрона и јона) тако да електричне и магнетне силе играју доминантну улогу у динамици система.

Међутим, сама чињеница да у систему постоје наелектрисане честице није довољна да би се он сматрао плазмом. Основни услов за постојање плазме јесте **квази-неутралност**, односно приближна једнакост концентрација позитивних и негативних наелектрисања на макроскопским скалама. Такође, квази-неутралност дефинише се као способност система да на макроскопском нивоу ефикасно екранира (пригушује) локална електрична поља. Ова способност екранирања описује се величином која се назива **Дебајева дужина** [1] [2].

1.1.1. Дебајева дужина

Дебајева дужина представља карактеристичну просторну скалу на којој електрично поље, настало услед присуства наелектрисане честице, бива екранирано услед реорганизације осталих слободних носилаца наелектрисања у плазми. Другим речима, то је растојање на коме електростатички потенцијал опада приближно за фактор e у односу на своју почетну вредност [1] [2].

Математички, Дебајева дужина дефинисана је изразом:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}} \quad (1)$$

где је:

- ϵ_0 - диелектрична константа вакуума [$8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$]
- k_B - Болцманова константа [$1.381 \times 10^{-23} \text{J/K}$]
- T_e - температура електрона плазме [K]
- n_e - густина електрона [m^{-3}]
- e - елементарно наелектрисање [$1.602 \times 10^{-19} \text{C}$]

Из једначине (1) јасно произилази да Дебајева дужина:

- расте са температуром електрона,
- опада са порастом густине електрона.

1.1.2. Критеријум плазмености

Да би систем могао да се сматра плазмом, морају бити испуњена два кључна услова [1]:

1. Карактеристична димензија система мора бити много већа од Дебајеве дужине

$$L \gg \lambda_D \quad (2)$$

2. Број честица унутар Дебајеве сфере мора бити много већи од јединице

$$N_D = \frac{4}{3} \pi n_e \lambda_D^3 \gg 1 \quad (3)$$

Ови услови указују да плазма може да се понаша као колективни систем, у којем појединачне честице не доминирају понашањем целине.

1.1.3. Дебајева дужина у експлозивом генерисаној плазми

Код експлозивом генерисане плазме, густине електрона достижу вредности реда $n_e \sim 10^{22} - 10^{24} \text{m}^{-3}$, док су температуре електрона реда неколико хиљада до десетак хиљада келвина. Убацавањем ових вредности у једначину (1), добија се [3] [4]:

$$\lambda_D^{\text{ЕП}} \sim 10^{-8} - 10^{-6} \text{m} \quad (4)$$

што указује да је Дебајева дужина експлозивом генерисане плазме изузетно мала, односно да је електрично поље ефикасно екранисано на микроскопским растојањима [1] [3].

Физичка последица мале Дебајеве дужине јесте да експлозивом генерисана плазма веома ефикасно екранира електрична поља, показује понашање слично металном

проводнику и може да преноси импулс и енергију на веома кратким просторним скалама [3].

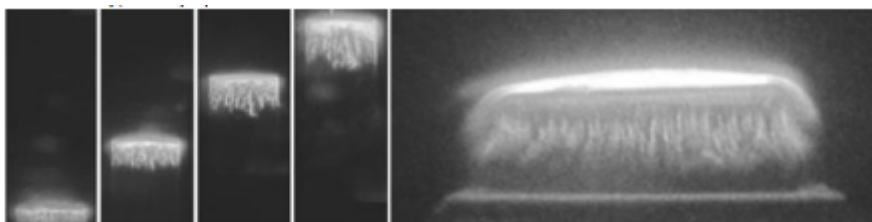
У контексту безбедног уништавања неексплодираних убојних средстава, мала Дебајева дужина указује да је дејство експлозивом генерисане плазме локализовано, просторно ограничено и не доводи до неконтролисаног ширења електричних поља.

Ово својство је један од кључних разлога зашто се ЕГП може разматрати као средство за контролисано дејство на експлозивне материјале без иницирања детонације.

1.2. Детонација као извор ЕГП

1.2.1. Детонација кондензованих експлозива и настанак ЕГП

Детонација кондензованих експлозива представља изузетно брз физичко-хемијски процес у коме се хемијска енергија експлозива ослобађа у виду ударног таласа, високих температура и притисака у веома кратком временском интервалу. При изласку детонационог таласа на слободну површину експлозива долази до формирања јако јонизоване материје која се избацује у околни гасни медиј. Ова појава је позната као **експлозивно генерисана плазма** [3] [4].



Слика 1. Низ слика простирања ЕГП кроз *PMMA* цев (лево) и изласка ЕГП из цеви (десно) [5]

Јонизација у детонационој зони може бити последица више механизма. Први механизам је термална јонизација, при којој висока температура доводи до одвајања електрона од атома и молекула. Други механизам је хемијска јонизација, која настаје услед присуства високоенергетских радикала и реакционих интермедијера. Трећи механизам односи се на ударну јонизацију, при којој честице са високом кинетичком енергијом изазивају додатну јонизацију сударајући се са неутралним честицама [6].

Експлозивно генерисана плазма не настаје као последица класичне термичке јонизације гаса услед ударног таласа, већ је примарно резултат хемијске јонизације (енгл. *chemionization*) у зони детонационе реакције кондензованог експлозива. Јони и слободни електрони настају директно у реакционој зони [6].

Важно је нагласити да јонизација у детонационој зони не доводи одмах до стабилне плазме у класичном смислу. Унутар саме детонационе зоне, систем је снажно компримован и доминирају сударни процеси. Међутим, када детонациони фронт достигне слободну површину експлозива, долази до нагле експанзије продуката и формирања услова погодних за развој експлозивом генерисане плазме у спољашњем медију [6].

Овај тренутак представља кључну фазу у настанку експлозивом генерисане плазме и повезује унутрашње процесе у експлозиву са спољашњим плазменим феноменима.

У зони детонације кондензованих експлозива остварују се екстремни термодинамички услови. Температуре достижу вредности реда величине 10^4 K, док притисци могу бити виши од неколико десетина GPa. У таквим условима долази до интензивне дисоцијације и јонизације молекула продуката детонације, што резултира значајним концентрацијама слободних електрона, често већим од 10^{22} - 10^{24} m⁻³ у непосредној близини реакционе зоне [6]

Експериментално је показано да унутрашња плазма у реакционој зони детонације садржи изузетно високе концентрације слободних електрона, али да се она унутар експлозива брзо рекомбинује. Насупрот томе, **спољашња (екстерна) плазма**, која се избацује у околни гас, може опстати значајно дуже — од неколико стотина наносекунди до више стотина микросекунди, у зависности од услова средине и геометрије [6].

1.2.2. Формирање плазме на слободној површини експлозива

Кључни тренутак за настанак експлозивом генерисане плазме настаје када детонациони фронт достигне слободну површину експлозива и пређе у контакт са околним медијом. У овој фази долази до нагле промене граничних услова, што доводи до квалитативно новог режима понашања јонизованих продуката детонације.

Унутар детонационе зоне, јонизовани производи су изложени екстремном притиску и високој густини, при чему доминирају сударни процеси. Међутим, на слободној површини долази до нагле декомпресије и експанзије продуката детонације у околни гас. Ова експанзија се одвија на временским скалама реда наносекунди и доводи до брзог смањења густине, при чему електрони, због своје мале масе, реагују знатно брже од јона и неутралних честица [3] [6].

Као последица различитих брзина експанзије, долази до **просторног раздвајања наелектрисаних честица**, што узрокује настанак локалних електричних поља на граници експлозив–гас. Ова електрична поља убрзавају слободне електроне и могу довести до секундарне јонизације околног медија. Управо овај процес представља један од основних механизма иницирања плазме ван саме детонационе зоне [6].

Поред електростатичких ефеката, нагла експанзија јонизованих продуката доводи и до појаве импулсних електричних струја. Ове струје су последица колективног кретања наелектрисаних честица и јављају се пре него што механички ударни талас стигне у исту просторну област. Присуство ових струја представља један од најранијих индикатора да се систем налази у плазменом режиму, а не у режиму класичне гасне динамике [7].

Формирана плазма на слободној површини експлозива у почетној фази има високу електронску густину и релативно малу просторну дебљину. Међутим, услед експанзије и интеракције са околним медијом, плазмена зона се брзо шири и поприма сложену просторну структуру. Ова структура није хомогена, већ садржи регионе различитог степена јонизације, температуре и проводљивости.

Важно је нагласити да формирање експлозивом генерисане плазме на слободној површини није искључиво термални процес. Иако висока температура игра значајну улогу, колективни електромагнетни ефекти и динамика наелектрисаних честица имају кључну улогу у одржавању плазменог стања током почетне фазе развоја. Ова чињеница објашњава зашто експлозивом генерисана плазма може постојати и у условима у којима би класични термални модели предвидели брзу рекомбинацију.

Формирање плазме на слободној површини експлозива представља, стога, прелазну фазу између унутрашњих процеса детонације и спољашњих плазмених и електромагнетних феномена. Разумевање ове фазе је од суштинског значаја за даљу анализу временског развоја, просторне пропагације и интеракције експлозивом генерисане плазме са околним медијем [3] [6].

1.2.3. Јонизациони таласи и њихов однос са ударним таласом

Једна од кључних разлика између експлозивом генерисане плазме и класичних гаснодинамичких појава јесте појава **јонизационих таласа** који се простиру испред механичког ударног таласа. Ови таласи представљају фронтове повећане јонизације и

електричне активности који се јављају услед колективних процеса у систему наелектрисаних честица, а не као последица механичке компресије гаса [7].

Јонизациони талас настаје услед наглог ослобађања електрона на слободној површини експлозива и њиховог убрзаног кретања у околни медиј. Због своје мале масе, електрони реагују на локална електрична поља знатно брже него јони и неутралне честице. Ово доводи до формирања фронта у коме електрони претходе главној маси продуката детонације, изазивајући секундарну јонизацију околног гаса.

За разлику од ударног таласа, чија се брзина одређује термодинамичким својствима гаса и условима компресије, брзина јонизационог таласа зависи од електромагнетних услова и може бити знатно већа. Експериментална истраживања показују да се јонизациони таласи могу ширити брзинама које превазилазе локалну брзину звука у гасу, па чак и брзину самог ударног таласа. Ова чињеница представља снажан доказ да се ради о феномену који није могуће описати искључиво у оквиру класичне гасне динамике [7].

Временско раздвајање између јонизационог и ударног таласа има посебан значај. Док се јонизациони талас јавља практично тренутно након достизања слободне површине, механички ударни талас захтева одређено време да се формира и простре у околни медиј. Ова временска разлика, иако често реда наносекунди до микросекунди, довољна је да омогући плазмене и електромагнетне процесе који делују у одсуству значајног механичког притиска.

Јонизациони таласи су праћени појавом импулсних електричних струја и електромагнетних поља. Ови ефекти су директна последица колективног кретања наелектрисаних честица и не могу се објаснити једноставним моделима проводљивости компримованог гаса. Присуство јонизационих таласа је, стога, један од кључних индикатора да се систем налази у плазменом режиму. Јонизациони таласи нису стабилне структуре, већ пролазни феномени који се развијају и распадају у веома кратким временским интервалима. Њихова стабилност и домет зависе од више фактора, укључујући електронску густину, састав и притисак околног медија, као и геометрију слободне површине експлозива. У условима повећаног притиска или присуства електронегативних гасова, јонизациони таласи се брже пригушују услед рекомбинације и хватања електрона [7].

Раздвајање јонизационих и ударних таласа има далекосежне последице за разумевање интеракције експлозивом генерисане плазме са околином. Оно указује да плазма може да делује на објекте у свом домету пре него што до њих стигну значајни механички ефекти. Управо ова чињеница представља физичку основу за разматрање локализованог дејства експлозивом генерисане плазме [3] [7].

1.2.4. Колективни ефекти и кохезија у експлозивом генерисаној плазми

Једна од суштинских карактеристика експлозивом генерисане плазме јесте изражено **колективно понашање** наелектрисаних честица. За разлику од разређеног јонизованог гаса, где доминирају појединачни судари, у експлозивом генерисаној плазми интеракције су у великој мери одређене дугодометним електромагнетним силама. Управо ова чињеница омогућава постојање кохерентних структура и организованог кретања честица, упркос изузетно кратком трајању плазме [2].

Колективни ефекти настају када је број наелектрисаних честица унутар карактеристичне запремине довољно велик да понашање појединачних честица буде одређено укупним електричним и магнетним пољима система. У експлозивом генерисаној плазми, висока електронска густина и мала Дебајева дужина обезбеђују да локалне електричне неправилности буду ефикасно екранисане, док се истовремено одржава глобална кохерентност плазмене зоне.

Појам **кохезије плазме** односи се на способност плазме да задржи компактну, просторно повезану структуру током свог развоја. У експлозивом генерисаној плазми, кохезија је последица равнотеже између експанзије услед термалног притиска и електромагнетних сила које делују између наелектрисаних честица. Иако плазма није у стационарном стању, ова привремена равнотежа омогућава да се плазмена зона понаша као јединствен физички објект током кратког временског интервала [8].

Истраживања показују да експлозивом генерисана плазма може задржати кохерентност и током просторне пропагације у околни медиј. Ово понашање не може се објаснити класичним моделима дифузије или слободне експанзије гаса, већ захтева увођење колективних плазмених механизма. Посебно је значајна улога електронске динамике, јер брзо кретање електрона омогућава настанак електричних струја и пратећих магнетних поља која доприносе стабилизацији плазмене структуре.

Колективни ефекти у експлозивом генерисаној плазми имају и директне енергетске последице. Иако је укупна енергија плазме релативно мала у поређењу са хемијском енергијом експлозива, енергија може бити просторно и временски концентрисана кроз одређене процесе. Ова концентрација енергије омогућава појаву интензивних локалних електромагнетних и термичких ефеката, који играју важну улогу у интеракцији плазме са околином.

Кохезија експлозивом генерисане плазме није апсолутна и временски је ограничена. Како време одмиче, рекомбинациони процеси, судари са неутралним честицама и геометријска експанзија доводе до постепеног губитка кохерентности. Међутим, током раних фаза развоја, плазма поседује довољан степен кохезије да се њено понашање не може свести на збир независних кретања појединачних честица [2] [8].

1.2.5. Електронска густина и плазмена фреквенција

Електронска густина представља један од најважнијих параметара за опис експлозивом генерисане плазме, јер директно одређује интензитет колективних ефеката, електромагнетни одзив система и карактеристичне временске скале плазмених процеса. У контексту експлозивом генерисане плазме, електронска густина није константна величина, већ параметар који се брзо мења у времену и простору, у зависности од фазе развоја плазме и услова у околном медију [2].

Електронска густина n_e дефинише се као број слободних електрона по јединици запремине. У експлозивом генерисаној плазми, вредности густине електрона достижу изузетно високе редове величина, често упоредиве са густинама слободних носилаца у чврстим проводницима. Експериментална мерења и индиректне процене указују да се у раним фазама развоја плазме електронска густина креће у опсегу [1] [2]:

$$n_e \sim 10^{22}-10^{24} \text{ m}^{-3} \quad (5)$$

Овако високе густине последица су интензивне јонизације продуката детонације и кратког времена у коме рекомбинациони процеси још нису доминантни.

Једна од кључних последица високе електронске густине јесте појава карактеристичних колективних осцилација електрона, познатих као **плазмене осцилације**. Учестаност ових осцилација описује се плазменом фреквенцијом електрона, која се у класичној плазменој теорији дефинише релацијом [2]:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (6)$$

где су,

- ω_{pe} - електронска плазмена угаона фреквенција [rads^{-1}]
- n_e - концентрација електрона у плазми [m^{-3}]
- e - елементарно наелектрисање [$e=1.602 \times 10^{-19}\text{C}$]
- ϵ_0 - диелектрична пермитивност вакуума [$\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}\text{Fm}^{-1}$]
- m_e - маса електрона [$m_e=9.109 \times 10^{-31}\text{kg}$]

За типичне вредности електронске густине у експлозивом генерисаној плазми, добијају се плазмене фреквенције реда:

$$\omega_{pe} \sim 10^{11} - 10^{12} \text{rad/s} \quad (7)$$

што одговара временским скалама осцилација реда пикосекунди до наносекунди. Ове временске скале су знатно краће од карактеристичних времена механичких процеса, као што су ширење ударног таласа или макроскопска експанзија гаса.

Висока плазмена фреквенција има неколико важних последица. Пре свега, она значи да електрони у експлозивом генерисаној плазми могу веома брзо да реагују на електрична и електромагнетна поља. Као резултат, плазма може ефикасно да подржи импулсне струје и краткотрајна електромагнетна поља, што је у складу са експериментално регистрованим електромагнетним импулсима који прате детонацију.

Додатно, однос плазмене фреквенције и сударне фреквенције електрона представља важан критеријум за процену доминације колективних ефеката. У раним фазама развоја експлозивом генерисане плазме, плазмена фреквенција је често већа од ефективне сударне фреквенције, што омогућава развој колективних осцилација и оправдава примену плазменог приступа у анализи система. Како плазма еволуира и електронска густина опада услед рекомбинације и експанзије, овај однос се мења, а колективни ефекти постепено губе доминацију [2] [6].

1.2.6. Сударни процеси и релаксација у експлозивом генерисаној плазми

Сударни процеси и пратеће релаксационе појаве имају кључну улогу у еволуцији експлозивом генерисане плазме, јер одређују брзину губитка јонизације, расподелу енергије између различитих степени слободе и трајање колективних ефеката. За разлику од стационарних или дуготрајних плазми, код експлозивом генерисане плазме

релаксациони процеси се одвијају у условима изразите неравнотеже и на веома кратким временским скалама.

Основни сударни механизми у експлозивом генерисаној плазми могу се поделити на три групе: судари електрон–електрон, судари електрон–јон и судари електрон–неутрал. Судари електрон–електрон су одговорни за успостављање расподеле енергије у електронском подсистему и одвијају се на најкраћим временским скалама, услед мале масе електрона и њихове високе покретљивости. Ови судари доводе до брзе термализације електронске компоненте, мада та термализација често остаје локална и привремена [1] [6].

Судари електрон–јон играју важну улогу у преносу енергије са електрона на тешке честице. Међутим, због велике разлике у масама, овај процес је знатно спорији у односу на електрон–електрон сударе. Као последица, електронска температура може бити значајно виша од температуре јона и неутралних честица током значајног дела трајања плазме. Ова чињеница представља један од основних разлога неравнотежног карактера експлозивом генерисане плазме [1] [6].

Судари електрон–неутрал постају посебно значајни након што плазма почне да интерагује са околним медијом. У зависности од притиска и хемијског састава околног гаса, ови судари могу довести до брзе рекомбинације и губитка слободних електрона. У присуству електронегативних молекула, као што су кисеоник или водена пара, долази до ефикасног хватања електрона, што додатно убрзава деградацију плазме.

Карактеристично време између судара електрона са честицама медија може се приближно описати као [6]:

$$\tau_c \sim \frac{1}{n\sigma v} \quad (8)$$

где је n густина честица са којима долази до судара, σ ефективни сударни пресек, а v карактеристична брзина електрона. За услове експлозивом генерисане плазме, ова времена могу бити упоредива или већа од плазмених временских скала, што омогућава развој колективних процеса пре него што судари постану доминантни.

Релаксациони процеси у експлозивом генерисаној плазми не доводе до класичне термодинамичке равнотеже. Уместо тога, систем пролази кроз серију пролазних стања у којима различити подсистеми (електронски, јонски, вибрациони) поседују различите

ефективне температуре. Овај неравнотежни режим траје све док рекомбинација и експанзија не доведу до значајног смањења густине и губитка плазмених својстава.

Од односа између брзине релаксације и карактеристичних плазмених временских скала зависи да ли ће колективни и електромагнетни ефекти имати доминантну улогу или ће плазма брзо прећи у режим слабо јонизованог гаса [1] [6].

1.2.7. Електрична проводљивост експлозивом генерисане плазме

Електрична проводљивост представља једно од најважнијих макроскопских својстава експлозивом генерисане плазме, јер директно одређује њену способност да подржи електричне струје и генерише електромагнетне ефекте. У контексту експлозивом генерисане плазме, проводљивост је изразито временски и просторни параметар, који достиже високе вредности током раних фаза развоја, а затим брзо опада услед рекомбинације и експанзије [9].

Класичан приступ опису електричне проводљивости плазме заснива се на Друдеовом моделу (енгл. *Drude model*), који, у поједностављеном облику, описује кретање електрона под дејством електричног поља уз утицај сударних процеса. Према овом моделу, електрична проводљивост σ дата је изразом [9] [10]:

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e \nu} \quad (9)$$

где је n_e електронска густина, e елементарно наелектрисање, m_e маса електрона, а ν ефективна сударна фреквенција електрона са другим честицама у плазми.

У експлозивом генерисаној плазми, висока електронска густина у раним фазама развоја доводи до великих вредности проводљивости, чак и у условима релативно високе сударне фреквенције. Ово омогућава настанак импулсних струја великог интензитета, које су експериментално регистроване у бројним истраживањима. Важно је нагласити да ове струје настају пре значајног механичког дејства ударног таласа, што указује на њихово плазмено, а не гаснодинамичко порекло.

Друдеов модел пружа користан оквир за квалитативно разумевање понашања проводљивости, али има и своја ограничења. Он подразумева стационарне услове и хомоген систем, што није у потпуности испуњено у експлозивом генерисаној плазми. У стварности, параметри као што су електронска густина и сударна фреквенција мењају се на временским скалама упоредивим са самим плазменим процесима. Због тога се

вредности проводљивости добијене овим моделом морају тумачити као редови величина, а не као прецизне локалне вредности [9].

Електрична проводљивост експлозивом генерисане плазме има директне последице на њена електромагнетна својства. Висока проводљивост омогућава проток краткотрајних струјних импулса, који, према Максвеловим једначинама, доводе до појаве пратећих магнетних поља и електромагнетних импулса. Ови импулси су регистровани у експериментима и представљају један од најубедљивијих индиректних доказа постојања експлозивом генерисане плазме [9].

Како време одмиче, рекомбинациони процеси и интеракција са околним медијом доводе до смањења електронске густине и повећања сударне фреквенције, што резултује наглим падом електричне проводљивости. Овај пад проводљивости означава прелаз плазме у режим слабо јонизованог гаса, у коме колективни и електромагнетни ефекти више нису доминантни [3] [9].

1.2.8. Магнетна поља и електромагнетни импулси у експлозивом генерисаној плазми

Појава магнетних поља и пратећих електромагнетних импулса представља један од најкарактеристичнијих аспеката експлозивом генерисане плазме. Ови феномени су директна последица постојања импулсних електричних струја у плазменом медију и представљају снажан доказ да се систем не може описати искључиво у оквиру класичне гасне динамике [9].

Према основним принципима електродинамике, сваки временски променљив ток наелектрисаних честица праћен је појавом магнетног поља. У експлозивом генерисаној плазми, импулсне струје настају услед колективног кретања електрона у раним фазама развоја плазме, када је електрична проводљивост висока. Ове струје имају кратко трајање, али могу достићи значајне интензитете, што доводи до појаве јаког, али краткотрајног магнетног поља [9].

Интензитет магнетног поља повезан је са густином струје и геометријом плазмене зоне. Квалитативно, магнетно поље може се проценити применом Амперовог закона, при чему локалне вредности магнетне индукције могу достићи значајне редове величина у непосредној близини плазме. Иако је укупна енергија магнетног поља мала у односу на хемијску енергију експлозије, њена просторна и временска концентрација омогућава појаву локалних електромагнетних ефеката [9].

Електромагнетни импулси (ЕМП) настају као последица брзих промена струје и магнетног поља у плазми. Ови импулси имају изузетно кратко трајање и широк фреквентни спектар, што их чини посебно значајним са становишта интеракције са околним електронским и електричним системима. Експериментална мерења су показала да се електромагнетни импулси јављају у временском интервалу који претходи доласку механичког ударног таласа, што додатно потврђује њихово плазмено порекло [9].

Појава магнетних поља и електромагнетних импулса у експлозивом генерисаној плазми није секундарни ефекат, већ интегрални део њене динамике. Магнетна поља могу повратно утицати на кретање наелектрисаних честица, доприносећи стабилизацији или усмеравању плазмене структуре у раним фазама развоја. Ова међусобна спрегнутост електричних струја и магнетних поља представља један од основних механизма колективног понашања плазме [9].

Како плазма еволуира и електрична проводљивост опада, импулсне струје се гасе, а магнетна поља и електромагнетни импулси брзо слабе. Овај процес означава крај фазе у којој су електромагнетни ефекти доминантни и прелазак система у режим у коме преовлађују термички и гаснодинамички механизми. Ипак, управо рана фаза, обележена снажним електромагнетним појавама, има највећи значај за разумевање физике експлозивом генерисане плазме и њених потенцијалних примена [3] [9].

1.2.9. Просторна пропагација експлозивом генерисане плазме

Просторна пропагација (ширење) експлозивом генерисане плазме одређује домет плазменог дејства и могућност интеракције са објектима који се налазе ван непосредне зоне детонације. За разлику од класичних продуката експлозије, чије кретање доминира механичка експанзија гаса, просторна динамика експлозивом генерисане плазме у великој мери је условљена електромагнетним и колективним процесима.

Након настанка на слободној површини експлозива, ЕГП се простира у околни гасни медиј у облику високојонизованог фронта који може претходити хидродинамичком ударном таласу. Овај феномен је у литератури описан и као **јонизациони талас**, који се креће брзинама знатно већим од класичне брзине звука у гасу. [7]

Експериментална мерења показују да се брзина ЕГП креће у опсегу од приближно 6–14 km/s при пропагацији кроз праве цилиндричне вођице, док у конусним

геометријама може достићи и до 25 km/s. Промена геометрије доводи до концентрације и убрзања плазме, што значајно утиче на њену кинетику и интеракцију са чврстим препрекама [5].

Непосредно након формирања на слободној површини експлозива, плазмена зона почиње да се простире у околни медиј. Брзина ове почетне пропагације може бити знатно већа од брзине механичког ударног таласа, што је последица убрзаног кретања електрона и јона под дејством локалних електричних поља. Експериментална истраживања указују да се карактеристичне брзине плазменог фронта крећу у опсегу од неколико километара у секунди, а у појединим конфигурацијама могу достићи и веће вредности.

Просторна структура експлозивом генерисане плазме није хомогена. У раним фазама развоја, плазма се често јавља у облику релативно компактног фронта или ејекта, који задржава кохерентност током одређеног времена. Ова кохерентност је последица равнотеже између електромагнетних сила које делују стабилизујуће и експанзионих процеса који теже распршивању плазме. Како се плазма удаљава од слободне површине експлозива, долази до постепеног ширења и фрагментације плазмене зоне [6].

Важан фактор који утиче на просторну пропагацију јесте **састав околног медија**. У ваздуху, присуство електронегативних молекула доводи до брже рекомбинације и хватања електрона, што скраћује домет и трајање плазме. Насупрот томе, у инертним гасовима или при сниженом притиску, плазма може да се простире на већа растојања и да дуже задржи кохерентну структуру. Ова зависност од медија представља један од кључних параметара који омогућавају контролу својстава експлозивом генерисане плазме у експерименталним условима [5] [6].

Геометрија слободне површине експлозива такође има значајан утицај на просторну пропагацију плазме. Равне површине доводе до релативно симетричног ширења плазме, док закривљене или усмерене геометрије могу фокусирати плазмени ејект у одређеном правцу. Ова појава је од посебног интереса у апликативним разматрањима, јер омогућава усмеравање плазменог дејства ка циљаном објекту [5] [6].

Како плазма напредује кроз медиј, њена енергија се постепено распоређује на већу запремину, а губици услед сударних процеса и рекомбинације постају све значајнији. Услед тога, електронска густина и електрична проводљивост опадају, што доводи до губитка плазмених својстава и преласка у режим слабо јонизованог гаса.

Домент плазменог дејства, стога, одређен је балансом између почетне енергије плазме, услова у околном медију и геометријских фактора. Само уколико се домент и просторна расподела плазме могу поуздано предвидети и контролисати, могуће је разматрати њено коришћење за локализовано дејство на неексплодирана убојна средства, уз минимизацију штетних последица [5] [6] [7].

1.2.10. Временске скале развоја експлозивом генерисане плазме

Временске скале развоја су кључне за настанак квалитетне ЕГП, јер управо од односа између различитих карактеристичних времена зависи да ли ће колективни плазмени ефекти имати физички значај или ће бити потиснути сударним и рекомбинационим процесима. За разлику од стационарних плазми, код експлозивом генерисане плазме сви процеси се одвијају у изузетно кратком временском интервалу, што захтева пажљиво раздвајање појединачних временских скала.

Најкраће временске скале у систему повезане су са електронским процесима. Карактеристично време електронских осцилација одређено је плазменом фреквенцијом и износи реда пикосекунди до наносекунди. На овим временским скалама електрони могу да се прилагоде променама електричних поља и да омогуће ефикасно електростатичко екранирање, што је предуслов за квази-неутрално понашање плазме [3].

Нешто дуже временске скале везане су за јонизационе процесе и настанак јонизационих таласа. Формирање плазме на слободној површини експлозива и иницијална секундарна јонизација околног медија одвијају се на временима реда наносекунди до десетина наносекунди. У овом периоду успоставља се основна структура плазме и јављају се први колективни електромагнетни ефекти [3] [7].

Временске скале **сударних процеса и релаксације** су типично дуже и крећу се у опсегу од десетина наносекунди до микросекунди, у зависности од густине и састава околног медија. Током овог периода долази до преноса енергије са електрона на јоне и неутралне честице, као и до постепене рекомбинације. Управо од односа између ових релаксационих времена и плазмених временских скала зависи трајање кохерентне плазмене фазе [5].

Паралелно са наведеним процесима, одвија се и **макроскопска експанзија плазме**, чије су временске скале упоредиве са временима развоја механичког ударног таласа, односно реда микросекунди. Иако је ова експанзија значајна са становишта

просторне расподеле енергије, она не одређује рану динамику плазме, која је доминирана електронским и колективним ефектима.

Посебно је важно нагласити да су временске скале плазмених процеса у експлозивом генерисаној плазми краће од временских скала механичких ефеката. Ова временска хијерархија омогућава да плазма делује на околину у временском прозору у коме механички притисци и температурни ефекти још увек нису доминантни. Управо ова чињеница представља физичку основу за разматрање локализованог и контролисаног дејства експлозивом генерисане плазме [3] [5].

Како време одмиче и релаксациони процеси постају доминантни, плазма постепено губи своја колективна својства. Електронска густина опада, Дебајева дужина расте, а електрична проводљивост се смањује, што доводи до преласка система у режим слабо јонизованог гаса. Овај прелаз означава крај фазе у којој експлозивом генерисана плазма може остварити значајне електромагнетне и колективне ефекте [3] [5].

1.2.11. Температурни режими и неравнотежна природа експлозивом генерисане плазме

Температурни опис експлозивом генерисане плазме представља један од најсложенијих аспеката њене физике, јер овај систем у највећем делу свог трајања не испуњава услове локалне термодинамичке равнотеже. За разлику од класичних термалних плазми, код којих се може говорити о јединственој температури система, експлозивом генерисану плазму карактерише постојање више различитих ефективних температура које се односе на различите подсистеме [1].

Најчешће се разликују електронска температура T_e , јонска температура T_i и температура неутралних честица T_n . У раним фазама развоја експлозивом генерисане плазме, електронска температура је знатно виша од температура тешких честица, што је директна последица механизма јонизације и енергетске апсорпције. Електрони, због своје мале масе, брзо апсорбују енергију електричних поља и јонизационих процеса, док је пренос те енергије на јоне и неутралне честице релативно спор [1] [2].

Типичне процене електронске температуре у експлозивом генерисаној плазми указују на вредности реда неколико хиљада до десетина хиљада келвина, док су температуре јона и неутралних честица знатно ниже, посебно у раним фазама развоја. Ова температурна неравнотежа омогућава постојање интензивних електронских процеса, као што су секундарна јонизација и емисија електромагнетног зрачења, чак и

када укупна термичка енергија система није довољна за одржавање класичне термалне плазме [3].

Неравнотежни карактер експлозивом генерисане плазме има важне последице за њену дијагностику и моделовање. Класични термодинамички модели, који подразумевају јединствену температуру и Максвелову расподелу брзина за све честице, нису директно применљиви. Уместо тога, потребно је користити приступе који омогућавају раздвајање подсистема и опис њихове међусобне интеракције на различитим временским скалама [1].

Временски развој температурних режима одређен је односом између енергетских улазних механизма и релаксационих процеса. Док електрони релативно брзо достижу квазистационарну расподелу енергије, изједначавање температура електрона и јона захтева значајно дуже време. У условима експлозивом генерисане плазме, ово време је често дуже од укупног трајања кохерентне плазмене фазе, што значи да систем никада не достиже пуну термодинамичку равнотежу [1].

Посебно је значајно нагласити да неравнотежни температурни режими омогућавају високу реактивност плазме уз релативно низак укупан термички утицај на околину. Ова особина је од изузетног значаја у контексту потенцијалних примена експлозивом генерисане плазме, јер омогућава остваривање локалних физичких и хемијских ефеката без значајног загревања или механичког оштећења ширег простора.

Неравнотежна природа експлозивом генерисане плазме такође утиче на њену емисиону спектроскопију, јер различити подсистеми доприносе зрачењу у различитим спектралним областима. Анализа ових спектралних карактеристика омогућава индиректно одређивање електронске температуре и степена јонизације [1].

1.2.12. Интеракција експлозивом генерисане плазме са материјалима

За разлику од класичних механичких или термичких дејстава експлозије, интеракција плазме са материјалом одвија се превасходно кроз **електромагнетне, електронске и површинске процесе**, често у временском интервалу који претходи значајном механичком оптерећењу.

Основни механизми интеракције могу се груписати у три категорије [11]:

1. електронско и јонско бомбардовање површине,

2. електромагнетно индуковани процеси,
3. локални термички и хемијски ефекти.

Електрони у експлозивом генерисаној плазми поседују високе ефективне температуре и могу достићи значајне кинетичке енергије. При контакту са површином материјала, ови електрони изазивају секундарну електронску емисију, локалну јонизацију и побуђивање атома у површинским слојевима. Ови процеси доводе до модификације електронске структуре материјала и могу иницирати локалне промене проводљивости и хемијске реактивности [6].

Јони, иако спорији од електрона, имају значајну улогу у интеракцији са материјалима због своје масе. Јонско бомбардовање може довести до *sputtering* ефеката, односно избацивања атома са површине материјала, као и до оштећења кристалне решетке у површинском слоју. У контексту експлозивом генерисане плазме, ови ефекти су локализовани и краткотрајни, али могу бити довољни да наруше структурни или хемијски интегритет осетљивих материјала, као што су експлозивна пуњења или иницијаторски склопови [11].

Електромагнетна поља повезана са импулсним струјама у плазми могу индуковати струје у проводним или полупроводним материјалима. Ове индуковане струје доводе до локалног загревања, електричног напрезања и, у екстремним случајевима, до електричног пробоја. Посебно је значајно да се ови ефекти могу јавити без директног физичког контакта између плазме и материјала, што омогућава дејство на одређеној удаљености [11].

Поред електронских и електромагнетних механизма, експлозивом генерисана плазма може изазвати и локалне термичке и хемијске ефекте. Иако укупна термичка енергија плазме није велика у поређењу са енергијом експлозије, њена просторна концентрација може довести до краткотрајног, али интензивног загревања површинских слојева материјала. Ово загревање, у комбинацији са присуством реактивних радикала, може иницирати хемијске промене или деградацију материјала [11].

Интеракција експлозивом генерисане плазме са материјалима зависи од низа фактора, укључујући електронску густину плазме, трајање дејства, растојање до површине, као и електрична и хемијска својства самог материјала. Ова осетљивост на параметре омогућава потенцијалну контролу дејства плазме, али истовремено представља и изазов за поуздано моделовање и предвиђање исхода интеракције.

Дејство експлозивом генерисане плазме не мора нужно довести до тренутног уништења експлозивног материјала. Уместо тога, оно често резултује **бенигном дезактивацијом**, односно губитком способности експлозива да поуздано детонира. Овај ефекат је посебно значајан у контексту неексплодираних убојних средстава, где је примарни циљ смањење ризика, а не максимално разарање [11].

1.2.13. Енергетски биланс експлозивом генерисане плазме и редови величина [4]

За разлику од класичних анализа експлозије, где је фокус на укупној хемијској енергији и механичком раду, у случају експлозивом генерисане плазме од посебног значаја је **просторна и временска концентрација енергије**, а не њен укупан износ.

Укупна хемијска енергија ослобођена детонацијом експлозива може се изразити као:

$$E_{\text{chem}} = m_{\text{exp}} \cdot Q \quad (10)$$

где је m_{exp} маса експлозива, а Q специфична енергија детонације (типично реда 10^6 J/kg). Само мали део ове енергије учествује у формирању плазме, док се највећи део трансформише у механички рад, топлоту и кинетичку енергију продуката детонације.

Енергија повезана са експлозивом генерисаном плазмом може се разложити на неколико компоненти:

1. енергију јонизације,
2. кинетичку енергију електрона и јона,
3. електромагнетну енергију повезану са струјама и пољима,
4. енергију зрачења.

Енергија јонизације E_{ion} може се проценити као:

$$E_{\text{ion}} \sim N_e \cdot I \quad (11)$$

где је N_e укупан број слободних електрона, а I карактеристична енергија јонизације. Иако је ова енергија по појединачном електрону релативно мала, велики број електрона доводи до значајне локалне акумулације енергије.

Кинетичка енергија електрона описује се изразом:

$$E_{k,e} = \frac{3}{2} N_e k_B T_e \quad (12)$$

где је T_e електронска температура. За електронске температуре реда 10^4K , добијају се енергије које су мале у апсолутном смислу, али изузетно концентрисане у времену и простору.

Посебно значајна компонента је **електромагнетна енергија**, повезана са импулсним струјама у плазми. Густина електромагнетне енергије може се изразити као:

$$u_{EM} = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad (13)$$

где су E и B јачине електричног и магнетног поља. Иако укупна електромагнетна енергија представља веома мали део E_{chem} , њена локална густина може достићи високе вредности у непосредној близини плазмене зоне.

Редови величина показују да је:

$$\frac{E_{\text{plasma}}}{E_{\text{chem}}} \ll 1 \quad (14)$$

типично реда $10^{-6} - 10^{-4}$. Међутим, овај однос може бити обмањујући уколико се посматра изоловано. Кључна карактеристика експлозивом генерисане плазме није у укупној енергији, већ у **енергетској густини** и **брзини испоруке енергије**.

Енергетска густина плазме може се приближно проценити као:

$$w \sim \frac{E_{\text{plasma}}}{V_{\text{plasma}}} \quad (15)$$

где је V_{plasma} ефективна запремина плазме. Због мале дебљине плазмене зоне и кратког трајања процеса, вредности w могу бити упоредиве или чак веће од енергетских густина у неким високоенергетским физичким системима.

Још један кључни аспект енергетског биланса је **снага**, односно брзина ослобађања енергије:

$$P \sim \frac{E_{\text{plasma}}}{\Delta t} \quad (16)$$

где је Δt трајање плазмене фазе. За временске интервале реда наносекунди до микросекунди, чак и мала количина енергије доводи до изузетно великих вредности тренутне снаге. Ово објашњава зашто експлозивом генерисана плазма може остварити значајне физичке ефекте упркос ограниченом енергетском учешћу.

Енергетски биланс јасно показује да експлозивом генерисана плазма не делује као класичан термички или механички извор енергије. Њено дејство заснива се на **екстремној концентрацији енергије у времену и простору**, што омогућава иницирање електронских, електромагнетних и хемијских процеса који би иначе захтевали знатно веће укупне енергије.

Дакле, уместо ослањања на масивну механичку детонацију, могуће је користити краткотрајне, високоинтензивне плазмене ефекте за локалну деградицију или дезактивацију експлозивног материјала. Енергетски биланс, стога, представља квантитативну основу за разумевање како релативно „мала“ плазма може имати диспропорционално велики физички утицај [11].

1.2.14. Ограничења и критични параметри примене експлозивом генерисане плазме

Иако експлозивом генерисана плазма показује значајан потенцијал за контролисано и локализовано дејство, њена примена је условљена низом **физичких, техничких и оперативних ограничења**. Разумевање ових ограничења је од суштинског значаја како би се избегло прецењивање домета плазменог дејства и како би се дефинисао реалан оперативни оквир у коме овај феномен може бити коришћен.

Једно од основних ограничења односи се на **изузетно кратко трајање плазменог стања**. Као што је показано у анализи временских скала, колективни плазмени ефекти постоје само у уском временском прозору, пре него што рекомбинација и експанзија доведу до распада плазме. То значи да сви механизми дејства морају бити остварени у временима реда наносекунди до микросекунди, што значајно ограничава домет и интензитет интеракције.

Други критичан параметар је **електронска густина**, која директно одређује плазмену фреквенцију, Дебајеву дужину и електричну проводљивост. Уколико је електронска густина сувише мала, колективни ефекти постају занемарљиви и плазма се понаша као слабо јонизован гас. Насупрот томе, превисока густина може довести до

појачане троделне рекомбинације и бржег распада плазменог стања. Стога постоји оптимални опсег електронске густине у коме је дејство плазме најефикасније.

Значајно ограничење представља и **утицај околног медија**. Присуство електронегативних молекула, као што су кисеоник или водена пара, убрзава хватање електрона и скраћује трајање плазме. Са друге стране, у инертним гасовима или при сниженом притиску, плазма може задржати своја својства током дужег временског интервала и на већем растојању. Ова зависност од медија значи да резултати добијени у лабораторијским условима нису увек директно применљиви у реалном окружењу.

Геометрија и растојање између извора плазме и циљаног експлозивног материјала представљају још један критичан фактор. Плазмено дејство нагло опада са растојањем услед експанзије и губитака енергије. Мала одступања у позиционирању могу довести до значајних разлика у интензитету дејства, што поставља високе захтеве у погледу прецизности примене.

Посебно важно ограничење односи се на **репродуктивност ефеката**. Због неравнотежне природе плазме и осетљивости на почетне услове, резултати интеракције могу показивати значајну варијабилност. Ово представља озбиљан изазов за практичну примену, јер безбедно уништавање неексплодираних убојних средстава захтева висок степен поузданости и предвидљивости.

Коначно, експлозивом генерисана плазма не представља универзално решење за све типове експлозивних средстава. Различити експлозиви, иницијаторски системи и конструктивне конфигурације показују различит степен осетљивости на плазмено дејство. У појединим случајевима, плазма може довести само до делимичне деградације или промене осетљивости, што захтева додатне кораке за потпуну неутрализацију средстава [11].

1.2.15. Рекомбинација и распад плазменог стања

Рекомбинација представља завршну фазу еволуције експлозивом генерисане плазме и кључни процес који доводи до губитка њених плазмених својстава. Под рекомбинацијом се подразумева везивање слободних електрона са позитивним јонима, при чему настају неутралне честице и ослобађа се енергија у виду електромагнетног зрачења или кинетичке енергије честица. У експлозивом генерисаној плазми,

рекомбинациони процеси одвијају се у условима изразите неравнотеже и снажних просторних и временских градијената.

Основни механизми рекомбинације у експлозивом генерисаној плазми укључују **радијативну рекомбинацију, троделну рекомбинацију и дисоцијативну рекомбинацију**, у зависности од састава плазме и услова околног медија. Радијативна рекомбинација подразумева директно везивање електрона за јон уз емисију фотона и доминира у условима релативно ниске густине. Насупрот томе, троделна рекомбинација постаје значајна при високим густинама, када трећа честица односи вишак енергије настале током рекомбинације.

У условима експлозивом генерисане плазме, висока почетна електронска густина погодује појави троделне рекомбинације у раним фазама распада плазме. Како плазма експандира и густина опада, радијативна рекомбинација постепено преузима доминантну улогу. Поред тога, у присуству молекулских јона, као што су јони настали из продуката детонације или молекула околног гаса, значајну улогу има и дисоцијативна рекомбинација, која доводи до распада молекула и стварања високо реактивних неутралних фрагмената.

Брзина рекомбинације зависи од електронске густине и температуре, као и од хемијског састава плазме. Карактеристично време рекомбинације може се грубо проценити из односа:

$$\tau_r \sim \frac{1}{\alpha n_e} \quad (17)$$

где је α ефективни коефицијент рекомбинације. За типичне параметре експлозивом генерисане плазме, ова времена могу бити реда десетина наносекунди до микросекунди, што је упоредиво са укупним трајањем плазмене фазе.

Како рекомбинација напредује, долази до наглог смањења електронске густине, повећања Дебајеве дужине и губитка квази-неутралности на већим просторним скалама. Електрична проводљивост опада, импулсне струје се гасе, а електромагнетни ефекти постају занемарљиви. Овај процес означава распад плазменог стања и прелаз система у режим слабо јонизованог или потпуно неутралног гаса.

Важно је нагласити да распад плазменог стања није тренутан нити једноличан процес. Због просторне нехомогености плазме, различити региони могу пролазити кроз

фазу рекомбинације различитим брзинама. Унутар плазмене зоне могу се привремено јављати џепови повећане јонизације, који задржавају плазмена својства нешто дуже од остатка система. Ова просторна неуједначеност додатно компликује експерименталну дијагностику и теоријско моделовање.

Рекомбинација и распад плазменог стања представљају природно ограничење трајања експлозивом генерисане плазме. Ипак, управо краткотрајност овог стања, у комбинацији са високим локалним енергетским густинама, чини експлозивом генерисану плазму посебно интересантном за примене у којима је потребно остварити интензивно, али временски ограничено дејство [1] [2].

2. КАРАКТЕРИЗАЦИЈА ЕКСПЛОЗИВОМ ФОРМИРАНЕ ПЛАЗМЕ

2.1. Методе експерименталне дијагностике

Карактеризација експлозивом генерисане плазме представља значајан експериментални изазов услед њене изузетно краткотрајне природе, снажних просторних и временских градијената и комплексне интеракције са околним медијом. За разлику од стационарних или дуготрајних плазми, код којих је могуће применити класичне дијагностичке технике, експлозивом генерисана плазма захтева употребу брзих, индиректних и често комбинованих метода мерења.

Експерименталне методе карактеризације могу се поделити у три основне групе [1]:

1. оптичке методе,
2. електричне и електромагнетне методе,
3. индиректне методе засноване на интеракцији плазме са околином.

Оптичке методе дијагностике заснивају се на анализи електромагнетног зрачења које емитује плазма током свог развоја. Ово зрачење може бити последица радијативне рекомбинације, атомских и молекулских прелаза, као и континуалне емисије услед слободно–слободних прелаза. Спектроскопска анализа емисије омогућава одређивање електронске температуре, степена јонизације и присутних врста у плазми, под условом да се пажљиво узму у обзир неравнотежни ефекти.

Посебан проблем код експлозивом генерисане плазме представља временска скала. Пошто се кључни процеси одвијају на временским скалама реда наносекунди до микросекунди, неопходно је користити брзе детекторе и синхронизоване системе за прикупљање података. У пракси се често примењују стробоскопске технике и брзе камере са временском резолуцијом довољном да се издвоје поједине фазе развоја плазме.

Електричне и електромагнетне методе дијагностике заснивају се на мерењу импулсних струја, електричних потенцијала и електромагнетних поља који прате настанак и еволуцију плазме. Ове методе имају посебну предност јер омогућавају регистровање плазмених ефеката чак и у условима када је оптички приступ ограничен

или немогућ. Мерења електромагнетних импулса представљају један од најпоузданијих индиректних доказа постојања експлозивом генерисане плазме.

Индиректне методе карактеризације ослањају се на посматрање последица интеракције плазме са околином, као што су промене електричне проводљивости медија, појава секундарне јонизације или модификације површина материјала изложених плазменом дејству. Иако ове методе не пружају директан увид у локалне параметре плазме, оне су од изузетног значаја за процену домета и ефеката плазменог дејства у реалним условима.

Комбинација наведених дијагностичких приступа омогућава релативно поуздану карактеризацију експлозивом генерисане плазме, упркос ограничењима која намећу њена краткотрајност и неравнотежна природа. Управо захваљујући развоју ових експерименталних техника, последњих деценија остварен је значајан напредак у разумевању физичких својстава експлозивом генерисане плазме.

2.2. Оптичка и спектроскопска карактеризација експлозивом генерисане плазме

Оптичка и спектроскопска дијагностика представљају један од најважнијих приступа у карактеризацији експлозивом генерисане плазме, јер омогућавају добијање информација о њеној температури, саставу, степену јонизације и просторном развоју, без директног нарушавања плазменог стања. Ове методе су посебно погодне за анализу краткотрајних и неравнотежних плазми, каква је експлозивом генерисана плазма, под условом да је обезбеђена довољна временска и спектрална резолуција.

Основни принцип оптичке дијагностике заснива се на анализи електромагнетног зрачења које плазма емитује током свог развоја. Ово зрачење може бити континуално или линијско, у зависности од доминантних физичких процеса. Континуална емисија најчешће потиче од слободно–слободних и слободно–везаних прелаза, док линијска емисија настаје услед електронских прелаза у атомима и јонима присутним у плазми [1] [7].

Спектроскопска анализа линијске емисије омогућава идентификацију атомских и јонских врста које учествују у плазменом процесу. У експлозивом генерисаној плазми, спектар емисије често садржи линије које потичу како од елемената присутних у експлозиву, тако и од компоненти околног медија. Присуство ових линија указује на

интеракцију плазме са окружењем и омогућава праћење просторне и временске еволуције плазмене зоне.

Један од кључних циљева спектроскопске дијагностике је одређивање **електронске температуре**. У идеалном случају, ова температура може се одредити применом Болцманове расподеле на интензитете више спектралних линија исте врсте. Међутим, због неравнотежне природе експлозивом генерисане плазме, примена овог приступа захтева опрез. Често се добијене температуре морају тумачити као **ефективне електронске температуре**, које одражавају просечно понашање електронског подсистема у датом временском интервалу.

Поред температуре, спектроскопија омогућава и процену **електронске густине**, најчешће кроз анализу проширења спектралних линија. Иако је ова метода индиректна и осетљива на претпоставке модела, она пружа један од ретких начина за квантитативну процену густине у експлозивом генерисаној плазми.

Оптичко снимање високе брзине представља допуну спектроскопским техникама и омогућава визуелизацију просторне структуре и динамике плазме. Брзе камере и стробоскопске технике омогућавају снимање плазменог фронта и праћење његовог ширења у времену. Ови снимци јасно показују да се плазмена зона често простире испред механичког ударног таласа, што представља директан визуелни доказ раздвајања плазмених и гаснодинамичких процеса.

2.3. Електрична и електромагнетна карактеризација експлозивом генерисане плазме

Електрична и електромагнетна мерења представљају један од најпоузданијих начина за карактеризацију експлозивом генерисане плазме, нарочито у условима када је оптичка дијагностика ограничена кратким трајањем процеса или неповољним геометријским условима. За разлику од оптичких метода, које пружају информације о локалним параметрима плазме, електрична и електромагнетна мерења омогућавају директан увид у колективно понашање наелектрисаних честица и глобалну динамику плазменог система.

Основни експериментални приступ у овој групи метода обухвата мерење импулсних електричних струја које настају током формирања и развоја плазме. Ове струје су последица наглог кретања електрона и јона услед локалних електричних поља

и представљају директну манифестацију високе електричне проводљивости плазме у раним фазама њеног постојања. Карактеристично је да се струјни импулси јављају у временском интервалу који претходи доласку механичког ударног таласа, што јасно указује на њихово плазмено, а не гаснодинамичко порекло [12].

Мерење струја се најчешће врши помоћу брзих сонди, коаксијалних кола или индуктивних сензора, при чему је неопходно обезбедити високу временску резолуцију и отпорност на електромагнетне сметње. Анализа облика и амплитуде струјних импулса омогућава процену електричне проводљивости плазме, као и индиректну процену електронске густине и динамике наелектрисаних честица.

Поред директних мерења струја, значајан део електричне карактеризације односи се на детекцију **електромагнетних импулса (ЕМП)** који прате експлозивом генерисану плазму. Ови импулси настају услед брзих временских промена струје и магнетног поља и могу се регистровати помоћу антенских система, калемова или брзих електромагнетних сензора. Карактеристично је да ЕМП сигнали имају широк фреквентни спектар, што одражава изузетно кратке временске скале процеса који их генеришу [12].

Анализа ЕМП сигнала пружа вредне информације о временској структури и интензитету плазмених процеса. Временска корелација између ЕМП импулса и оптичких или механичких сигнала омогућава јасно раздвајање плазмених и гаснодинамичких фаза експлозије. У бројним експериментима показано је да се ЕМП јављају у најранијој фази, што потврђује да су електромагнетни ефекти интегрални део настанка експлозивом генерисане плазме.

Електрична и електромагнетна карактеризација има и практичну предност у погледу примене у реалним условима. За разлику од оптичких метода, које захтевају директну линију вида и контролисане услове осветљења, ЕМП мерења могу се изводити на већим растојањима и у сложеним окружењима. Ово их чини посебно погодним за теренска испитивања и за анализу потенцијалне примене експлозивом генерисане плазме у безбедносним сценаријима.

2.4. Просторна и временска структура експлозивом генерисане плазме

Просторна и временска структура директно одражавају динамику настанка, развоја и распада плазменог стања. За разлику од стационарних плазми, код којих се структура може сматрати квази-стабилном, експлозивом генерисана плазма пролази кроз брзе и изражене промене у времену и простору [13].

Непосредно након достизања слободне површине експлозива, плазма се формира у облику релативно танког слоја или фронта који се простире у околни медиј. Ова почетна структура карактерише се високом електронском густином и јаком електричном активношћу, али релативно малом дебљином у поређењу са њеним бочним димензијама. Управо ова геометрија омогућава изузетно високе локалне густине енергије и појаву интензивних колективних ефеката [7].

Временска еволуција плазме одвија се у више фаза. У најранијој фази, која траје реда наносекунди, доминирају електронски процеси и формирање јонизационих таласа. У овој фази плазма показује најизраженије плазмене карактеристике, као што су висока проводљивост, импулсне струје и снажни електромагнетни импулси. Просторно, плазмена зона се може јавити испред механичког ударног таласа, што указује на раздвајање плазмених и гасодинамичких процеса [13].

Наредна фаза развоја обухвата временски интервал од десетина наносекунди до микросекунди, током кога долази до експанзије плазме и постепеног смањења електронске густине. У овој фази, просторна структура плазме постаје сложенија и често нехомогена, са појавом локалних региона повећане јонизације. Ови региони могу задржати кохерентност током краћег временског интервала, што указује на присуство колективних стабилизујућих механизма.

Како време одмиче, рекомбинациони процеси и интеракција са околним медијом доводе до распада плазмене структуре. Просторно, плазма се шири и губи јасно дефинисан фронт, док временски доминирају процеси губитка јонизације и опадања електричне проводљивости. У овој завршној фази, систем постепено прелази у режим слабо јонизованог гаса.

Геометрија експлозивног пуњења и услови у околном медију су важан фактор који утиче на просторну и временску структуру плазме. Усмерене или закривљене површине могу довести до фокусирања плазме и формирања изражених плазмених

ејеката, док хомогени услови доводе до симетричнијег ширења. Притисак и састав медија утичу на брзину експанзије и трајање плазменог стања.

Дакле, просторна структура експлозивом генерисане плазме одређена је комплексном интеракцијом између продуката детонације, околног медија и електромагнетних процеса који прате јонизацију. За разлику од класичног ударног таласа, који се може описати приближно сферно-симетричном хидродинамичком експанзијом, експлозивом генерисана плазма показује **јасно дефинисану, кохерентну и просторну структуру**, која се не може свести на једноставну гасну експанзију [7] [12].

Експериментална посматрања показују да се ЕГП формира као компактна плазмена зона у непосредној близини слободне површине детонирајућег експлозива и да се простире у правцу околног гаса, нормално на површину експлозива [11] [12]. Ова зона је јасно раздвојена од фронта механичког ударног таласа, што указује на различиту физичку природу ова два феномена.

2.4.1. Геометрија и димензије плазмене зоне

Геометрија експлозивом генерисане плазме у првој апроксимацији прати геометрију слободне површине експлозива. Код равних или благо закривљених површина, плазма има приближно **планарну или цилиндричну структуру**, док код сферних пуњења показује радијално ширење, али и даље са израженом аксијалном компонентом [3] [7].

Типични просторни параметри плазмене зоне су:

- иницијална дебљина плазме:

$$\delta_{pl} \sim 10^{-3} - 10^{-2} \text{ m} \quad (18)$$

- карактеристична дужина пропагације:

$$L_{pl} \sim 10^{-2} - 10^{-1} \text{ m} \quad (19)$$

Ове вредности зависе од врсте експлозива, масе пуњења и околног медија, али су редови величина конзистентни у различитим експериментима [3] [7].

2.4.2. Раздвајање плазме и ударног таласа

Једна од најзначајнијих карактеристика просторне структуре ЕГП јесте **јасно раздвајање плазмене зоне од механичког ударног таласа**. Истраживачи су експериментално показали да плазмена зона може да се јави испред ударног таласа и да се простира независно од њега [3].

Ово раздвајање има неколико важних последица:

- плазма није последица компресије гаса ударним таласом,
- електромагнетни и термички процеси доминирају у зони плазме,
- просторна позиција плазме омогућава дејство пре доласка механичког удара.

Са становишта примене у реалној ситуацији, ова особина је од кључног значаја јер омогућава **локализовано дејство без нужног механичког разарања**.

2.4.3. Унутрашња просторна неуниформност

Иако се ЕГП често описује као компактна зона, детаљна мерења показују да је она **просторно неуниформна**. Унутар плазмене зоне постоје изражени градијенти:

- електронске густине,
- температуре,
- електричне проводљивости.

Спектроскопска и оптичка мерења указују да је електронска густина највећа у непосредној близини слободне површине експлозива и да опада у правцу пропагације плазме [7]. Ово се може квалитативно повезати са ограниченим временом јонизације и постепеним доминирањем рекомбинационих процеса.

2.5. Временска карактеризација и фазе развоја експлозивом генерисане плазме

Временска карактеризација експлозивом генерисане плазме (ЕГП) од кључног је значаја за разумевање њене физичке природе и потенцијалне примене. За разлику од стационарних или квазистационарних плазми, ЕГП је **нестационарна појава**, чији се параметри мењају на временским скалама од наносекунди до микросекунди. Управо ова временска структура условљава доминацију неравнотежних процеса и ограничава применљивост класичних равнотежних модела [14].

На основу експерименталних посматрања и теоријских анализа, развој експлозивом генерисане плазме може се поделити на више карактеристичних фаза, које се делимично преклапају, али имају различите доминантне механизме.

2.5.1. Фаза иницијалне јонизације

Фаза иницијалне јонизације започиње у тренутку када детонациони фронт достигне слободну површину експлозива. У овом периоду доминирају:

- термална јонизација продуката детонације,
- хемијска јонизација услед присуства радикала,
- емисија слободних електрона из унутрашње плазме детонационе зоне.

Карактеристично време ове фазе је реда:

$$\tau_{\text{ion}} \sim 10^{-9} - 10^{-8} \text{s} \quad (20)$$

што је упоредиво са временом проласка реакционе зоне детонације [12] [14]. Због тако кратких временских скала, у овом периоду не може се говорити о било каквој термодинамичкој равнотежи.

2.5.2. Фаза кохерентног развоја и пропагације

Након иницијалне јонизације, формира се компактна плазмена зона која показује кохерентно понашање и почиње да се простира у околни медиј. У овој фази доминирају:

- колективни електромагнетни ефекти,
- јонизациони таласи који претходе ударном таласу,
- висока електрична проводљивост и импулсни токови струје.

Типично трајање ове фазе је:

$$\tau_{\text{coh}} \sim 10^{-8} - 10^{-5} \text{s} \quad (21)$$

у зависности од граничних услова и врсте околног гаса [3] [12] [7].

Плазмена фреквенција електрона у овом периоду је реда:

$$\omega_{pe} \sim 10^{11} - 10^{12} \text{rad/s} \quad (22)$$

што значи да плазма може да реагује на електромагнетне поремећаје знатно брже него што се механички процеси развијају. Ово временско раздвајање је основа за појаву електричних и електромагнетних ефеката који претходе механичком дејству [7] [13].

2.5.3. Фаза рекомбинације и распада

Како време одмиче, рекомбинациони процеси и дифузија почињу да доминирају над процесима јонизације. У овој фази долази до:

- смањења електронске густине,
- опадања електричне проводљивости,
- губитка кохерентне просторне структуре плазме.

Карактеристично време рекомбинације може се квалитативно проценити као:

$$\tau_{\text{rec}} \sim \frac{1}{\alpha n_e} \quad (23)$$

где је α ефективни коефицијент рекомбинације, а n_e електронска густина [5] [9]. За параметре типичне за ЕГП, ово време је реда микросекунди, што је у складу са експерименталним посматрањима [3] [7].

2.5.4. Поређење временских скала са механичким процесима

Важно је истаћи да су све наведене фазе временски **краће или упоредиве** са временом доласка и развоја механичког ударног таласа на истој просторни скали. Док ударни талас захтева време реда:

$$\tau_{\text{shock}} \sim \frac{L}{c_s} \sim 10^{-6} - 10^{-5} \text{ s} \quad (24)$$

где је L карактеристична дужина, а c_s брзина звука у компримованом гасу, електромагнетни и плазмени процеси у ЕГП одвијају се раније или истовремено [12].

Ово временско раздвајање представља један од најважнијих аргумената да дејство ЕГП није сведено на класичну механичку интеракцију ударног таласа са објектом.

2.6. Температурна карактеризација и спектроскопске методе

Температура експлозивом генерисане плазме (ЕГП) представља један од централних параметара њене карактеризације, али истовремено и један од најчешће погрешно интерпретираних. За разлику од плазми у локалној термодинамичкој равнотежи, код ЕГП не постоји јединствена „температура система“. Уместо тога, различити степени слободе (електронски, ротациони, вибрациони) могу бити описани различитим ефективним температурама [5] [7].

Због кратког трајања и екстремних градијената, директна контактна мерења температуре нису могућа, те се температурна карактеризација ЕГП заснива готово искључиво на **оптичкој емисионој спектроскопији**.

2.6.1. Појам ефективне температуре у неравнотежној плазми

У неравнотежној плазми, као што је експлозивом генерисана плазма, температура се дефинише у смислу расподеле енергије одређеног скупа стања. Тако постоје:

- електронска температура T_e ,
- ротациона температура T_{rot} ,
- вибрациона температура T_{vib} .

Ове температуре су, у општем случају, различите:

$$T_e \neq T_{vib} \neq T_{rot} \neq T_{gas} \quad (25)$$

што је директна последица кратких времена релаксације и различитих сударних механизма [5] [9].

2.6.2. Оптичка емисиона спектроскопија као дијагностички алат

Оптичка емисиона спектроскопија (ОЕС) представља основну дијагностичку методу за одређивање температуре ЕГП. Метод се заснива на анализи емисионих линија и трака које потичу од побуђених атомских и молекулских врста у плазми [7].

Код експлозивом генерисане плазме доминирају емисије молекулских система као што су:

- OH(A–X),
- CN(B–X),
- NH(A–X).

Ове емисије су посебно погодне за температурну анализу јер њихова спектрална структура омогућава раздвајање ротационих и вибрационих компоненти [3] [7].

2.6.3. Одређивање ротационе температуре

Ротациона температура се најчешће одређује анализом интензитета ротационих линија у оквиру једне молекулске траке. Под претпоставком Квази-Болцманове расподеле ротационих стања, интензитет линије може се записати као [5]:

$$I_{J'} \propto g_{J'} A_{J'J''} \exp\left(-\frac{E_{J'}}{k_B T_{rot}}\right) \quad (26)$$

где су:

- $g_{J'}$ - статистичка тежина стања,
- $A_{J'J''}$ - Ајнштајнов коефицијент,
- $E_{J'}$ - енергија ротационог стања.

Из нагиба праве у такозваном Болцмановом дијаграму може се одредити T_{rot} . За експлозивом генерисану плазму, добијене ротационе температуре су типично у опсегу:

$$T_{\text{rot}} \sim 5000 - 8000 \text{ K} \quad (27)$$

што се често интерпретира као добра апроксимација температуре тешких честица у плазми [3] [5] [7].

2.6.4. Вибрациона и електронска температура

Вибрациона температура одређује се анализом односа интензитета различитих вибрационих трака истог молекулског система. Због спорије релаксације вибрационих нивоа, T_{vib} је често већа од ротационе температуре [5].

Електронска температура се теже директно одређује у ЕГП, али се може индиректно проценити коришћењем LTE или квази-LTE модела у комбинацији са Сахаовом једначином:

$$\frac{n_e n_i}{n_0} = \left(\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2} \right)^{3/2} \exp\left(-\frac{E_{\text{ion}}}{k_B T_e}\right) \quad (28)$$

при чему се ова релација користи искључиво за процену редова величина [9].

Процењене вредности електронске температуре у ЕГП су реда:

$$T_e \sim 8000 - 15000 \text{ K} \quad (29)$$

у зависности од фазе развоја и просторне позиције у плазми [9] [7].

Важно је нагласити да температура у експлозивом генерисаној плазми није ни просторски ни временски константна. Спектроскопска мерења показују да температура:

- опада са растојањем од слободне површине експлозива,
- опада са временом услед рекомбинације и експанзије.

Типични температурни градијенти су значајни и потврђују да се добијене температуре морају тумачити као **локалне, ефективне вредности** [9].

2.7. Електронска густина, електрична проводљивост и електромагнетна својства

Електронска густина и пратећа електрична и електромагнетна својства представљају централне параметре за разумевање понашања експлозивом генерисане плазме (ЕГП). За разлику од термичких параметара, који се мењају релативно споро у односу на плазмене временске скале, електронска густина директно контролише колективну динамику, плазмену фреквенцију, екранирање електричних поља и интензитет електромагнетних ефеката [5] [7] [13].

2.7.1. Електронска густина као основни параметар плазме

Електронска густина n_e у ЕГП одређује степен јонизације и утиче на готово све релевантне физичке величине. Процене n_e добијају се комбинацијом:

- електричних мерења проводљивости,
- спектроскопских анализа,
- индиректних LTE/квази-LTE модела.

Резултати различитих истраживања показују конзистентне редове величина:

$$n_e \sim 10^{22} - 10^{23} \text{ m}^{-3} \quad (30)$$

са локално вишим вредностима у раним фазама развоја плазме и у близини слободне површине експлозива [3] [7] [13].

Тако високе електронске густине значе да је број слободних носилаца упоредив са густинама у металима, мада је трајање овог стања код ЕГП изузетно кратко.

2.7.2. Плазмена фреквенција и електродинамичка реакција

Колективна осцилација електрона у плазми карактерише се плазменом фреквенцијом:

$$\omega_{pe} = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e}} \quad (31)$$

За наведене електронске густине, добија се:

$$\omega_{pe} \sim 10^{11} - 10^{12} \text{ rad/s} \quad (32)$$

што одговара временским скалама реда пикосекунди до наносекунди [7] [13].

Ово значи да ЕГП може веома брзо да реагује на електричне и електромагнетне поремећаје, много пре него што механички процеси (нпр. експанзија гаса) постану доминантни. Управо ова чињеница лежи у основи експериментално посматраних електромагнетних импулса који прате настанак плазме [13].

2.7.3. Дебајево екранирање и просторне последице

Висока електронска густина доводи до малих Дебајевих дужина:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_e e^2}} \quad (33)$$

За типичне параметре ЕГП:

$$\lambda_D \sim 10^{-6} - 10^{-5} \text{ m} \quad (34)$$

што је знатно мање од карактеристичних димензија плазмене зоне [7] [14].

Ово подразумева да је плазма ефикасно екранисана и да локална електрична поља делују само на веома малим просторним скалама. Као последица, плазма се понаша као **квази-метални медиј** у кратком временском интервалу.

2.7.4. Електрична проводљивост и Друдеов модел

Електрична проводљивост експлозивом генерисане плазме може се квалитативно описати Друдеовим моделом [10]:

$$\sigma = \frac{n_e e^2}{m_e \nu} \quad (35)$$

где је ν ефективна сударна фреквенција електрона са јонима и неутралним честицама [7] [13].

Иако је ν тешко прецизно одредити у неравнотежној плазми, експериментална мерења указују на изузетно високе тренутне вредности проводљивости, које омогућавају настанак импулсних струја великог интензитета [13].

Друдеов модел се користи искључиво као оријентациони алат, јер не обухвата сложену кинетику судара и неравнотежне ефекте који доминирају у ЕГП.

2.7.5. Електромагнетни импулси и магнетна поља

Једна од најкарактеристичнијих експерименталних појава повезаних са ЕГП јесте појава краткотрајних електромагнетних импулса. Ови импулси су регистровани коришћењем Роговских (енгл. *Rogowski*) калемова и других брзих дијагностичких система [13].

Импулсне струје у плазми доводе до појаве пратећих магнетних поља, чија се енергија може приближно изразити као:

$$E_{\text{em}} \sim \int \frac{B^2}{2\mu_0} dV \quad (36)$$

Иако је укупна енергија електромагнетног поља релативно мала у поређењу са термичком и механичком енергијом детонације, њена временска и просторна концентрација омогућава значајне локалне ефекте [7] [13].

2.8. Утицај околног медија и граничних услова на својства експлозивом генерисане плазме

Својства експлозивом генерисане плазме у значајној мери зависе од карактеристика околног медија и граничних услова под којима се плазма формира и развија. За разлику од плазми у контролисаним лабораторијским условима, где се параметри медија могу прецизно подесити, експлозивом генерисана плазма најчешће настаје у сложеним и променљивим условима, што захтева детаљну анализу утицаја спољашњих фактора.

2.8.1. Утицај хемијског састава околног гаса

Хемијски састав околног медија има директан утицај на јонизационе и рекомбинационе процесе у ЕГП. У ваздуху, који садржи електронегативне молекуле као што су O_2 и H_2O , доминирају процеси хватања електрона, што доводи до бржег опадања електронске густине и краћег трајања плазме [7] [12].

Насупрот томе, у инертним гасовима (нпр. аргон, хелијум), електронегативни процеси су потиснути, па електронска густина спорије опада, рекомбинација је мање ефикасна, а плазма задржава кохерентност током дужег временског интервала.

Експериментална истраживања показују да у инертним гасовима трајање кохерентне ЕГП може бити продужено у односу на атмосферске услове [3] [7].

2.8.2. Утицај притиска околног медија

Притисак околног гаса утиче на сударне процесе и дифузију плазме. Са порастом притиска расте фреквенција електрон-неутралних судара, убрзавају се рекомбинациони процеси и смањује се средња слободна путања електрона.

Квалитативно, сударна фреквенција може се изразити као:

$$\nu \sim n_g \sigma v \quad (37)$$

где је n_g густина неутралних честица, σ ефективни сударни пресек, а v карактеристична брзина електрона [5].

Због ових механизма, при повишеним притисцима плазма брже губи кохерентност и електричну проводљивост. При сниженим притисцима, напротив, ЕГП може да се простира на већа растојања и да дуже задржи високу електронску густину [3] [7].

2.8.3. Геометрија и граничне површине

Геометрија простора у којем се плазма развија има значајан утицај на њену динамику. У отвореним геометријама, плазма се брзо шири и губи енергију услед експанзије и мешања са околним гасом. Насупрот томе, у ограниченим геометријама (нпр. цеви, канали), долази до:

- усмеравања плазме,
- смањења попречне дифузије,
- продуженог трајања кохерентне структуре.

Експериментални радови су показали да вођење плазме кроз цеви може довести до значајно већих домета и стабилније пропагације ЕГП [3] [7] [6] [11].

Интеракција плазме са чврстим граничним површинама доводи до губитака енергије путем:

- топлотног преноса,
- секундарне емисије електрона,
- рекомбинације на површинама.

Ови процеси су посебно значајни у ограниченим геометријама, где однос површине и запремине плазме може бити велик. Због тога граничне површине могу истовремено деловати као фактор стабилизације (усмеравање) и као фактор губитака [7].

2.8.4. Ограничења моделирања утицаја медија

Модели који описују утицај околног медија на ЕГП најчешће су поједностављени и заснивају се на претпоставкама локалне равнотеже или ефективних параметара. У реалним условима:

- плазма је снажно неуниформна,
- параметри се мењају у времену,
- постоји снажна спрегнутост са хемијским реакцијама.

Зависност ЕГП од околног медија и граничних услова представља кључну предност. Она указује да је могуће утицати на трајање, домет и интензитет плазме избором услова, без промене основног механизма настанка. Ова чињеница је од посебног значаја за разматрање контролисане примене експлозивом генерисане плазме у безбедном уништавању неексплодираних убојних средстава, где је прилагођавање услова често једини начин за постизање жељеног ефекта уз минималан ризик [5] [9].

Један од најважнијих параметара околног медија је притисак. Са порастом притиска, повећава се учесталост сударних процеса између електрона и неутралних честица, што доводи до брже рекомбинације и скраћења трајања плазменог стања. У условима атмосферског притиска, експлозивом генерисана плазма показује изузетно кратко трајање и ограничен домет, док при сниженим притисцима долази до значајног продужетка плазмене фазе и повећања просторне пропагације.

Хемијски састав медија такође има кључну улогу. Присуство електронегативних молекула, као што су кисеоник, водена пара или халогени, доводи до ефикасног хватања слободних електрона и убрзаног распада плазме. Насупрот томе, у инертним гасовима, као што су аргон или хелијум, електрони имају дужи животни век, што омогућава развој стабилнијих и просторније распрострањених плазмених структура. Ова зависност од састава медија представља важан алат за експерименталну контролу својстава плазме.

Поред притиска и састава, температура околног медија утиче на динамику плазме кроз промену сударних пресека и брзина честица. Иако је овај утицај мање изражен у

поређењу са притиском и хемијским саставом, он може бити релевантан у специфичним условима, посебно у комбинацији са другим факторима.

Гранични услови, односно геометрија и материјал површина у близини извора плазме, имају значајан утицај на њен просторни развој. Металне површине могу деловати као проводници и утицати на расподелу електричних поља, што доводи до локалног фокусирања или усмеравања плазмених струја. Изолациони материјали, са друге стране, могу довести до акумулације наелектрисања и појаве локалних електричних поља која мењају динамику плазме.

Геометрија слободне површине експлозива представља посебан гранични услов од значаја. Равне површине доводе до релативно симетричног ширења плазме, док закривљене или усмерене геометрије могу резултовати концентрацијом плазме у одређеним правцима. Овај ефекат је од посебног интереса са становишта примене, јер омогућава потенцијално усмеравање плазменог дејства ка циљаном објекту.

2.9. Синтеза карактеристичних параметара експлозивом генерисане плазме

2.9.1. Карактеристични параметри и редови величина

У Табели 2.1 приказани су основни параметри експлозивом генерисане плазме са одговарајућим редовима величина и напоменама о њиховој интерпретацији.

Табела 1. Карактеристични параметри експлозивом генерисане плазме

Параметар	Ознака	Ред величине	Напомена
Електронска густина	n_e	$10^{22}\text{--}10^{23} \text{ m}^{-3}$	Локално веће вредности у раним фазама
Електронска температура	T_e	8 000–15 000 K	Процењена, квази-LTE
Ротациона температура	T_{rot}	5 000–8 000 K	Приближно температура тешких честица
Дебајева дужина	λ_D	$10^{-6}\text{--}10^{-5} \text{ m}$	$\lambda_D \ll L_{pl}$
Плазмена фреквенција	ω_{pe}	$10^{11}\text{--}10^{12} \text{ rad/s}$	Брза ЕМ реакција
Трајање кохерентне плазме	τ_{pl}	$10^{-7}\text{--}10^{-4} \text{ s}$	Зависи од медија
Просторни домет	L_{pl}	$10^{-2}\text{--}10^{-1} \text{ m}$	Слободна пропагација у гасу
Локална енергетска густина	u_{pl}	$10^6\text{--}10^9 \text{ J/m}^3$	Кључна за локалне ефекте

Ова табела показује да ЕГП истовремено поседује параметре типичне за густе плазме, временске скале типичне за ултрабрзе процесе и просторну локализацију која је кључна за контролисано дејство.

Вредности параметара ЕПГ значајно зависе од:

- врсте и масе експлозива,
- геометрије слободне површине,
- састава и притиска околног медија,
- времена.

Ова варијабилност онемогућава дефинисање јединственог „стандардног“ скупа параметара за ЕГП и захтева да се сваки експеримент и примена посматрају у конкретном контексту [7] [9].

Посебно важан резултат синтезе карактеристичних параметара јесте чињеница да експлозивом генерисана плазма не представља термалну плазму у класичном смислу, нити се може описати једноставним хидродинамичким моделима. Њено понашање је одређено интеракцијом електронских, електромагнетних и сударних процеса, који делују на различитим временским и просторним скалама. Управо ова комплексност чини експлозивом генерисану плазму посебним физичким феноменом.

Синтеза параметара омогућава и јасније дефинисање граница применљивости различитих теоријских и експерименталних модела. У зависности од доминантних параметара, плазма може бити описана као квази-неутрална, слабо или јако неравнотежна, локализована или просторније распрострањена. Ова класификација је од суштинског значаја за правилну интерпретацију експерименталних резултата и за планирање будућих истраживања.

Синтеза карактеристичних параметара експлозивом генерисане плазме представља директну везу између теорије физике и примењених решења. Разумевање ових параметара омогућава да се реално процене могућности и ограничења примене плазме за безбедно дејство на неексплодирана убојна средства.

3. ИСТРАЖИВАЊА ЕКСПЛОЗИВОМ ФОРМИРАНЕ ПЛАЗМЕ

Током испитивања бризантних експлозива, многи истраживачи су приметили да детонациони талас, који пролази кроз ове експлозиве, показује високу електричну проводљивост [3]. У почетку, сматрало се да је јонизујући облак, који се емитује са површине експлозива приликом детонације, заправо ударни талас у околним гасовитим медијима који рефлектује високу светлост услед високих температура ударног таласа. Каснијим истраживањима [6] утврђено је да ови светлећи гасни облаци нису ударни талас, већ разређена плазма у којој су спољашни (валентни) електрони уклоњени из атома или молекула јонизацијом.

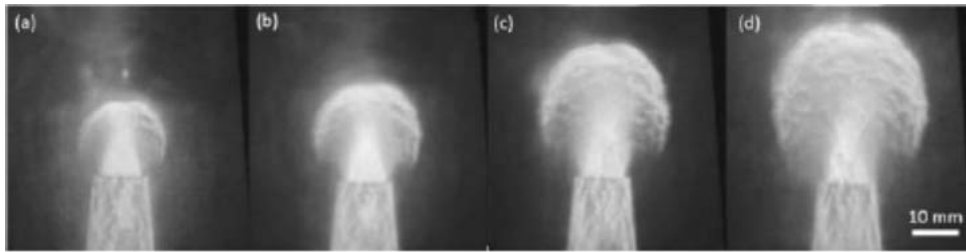
Када се ЕГП усмери у одређену тачку/површину њен млаз достиже температуру реда величине од 1 eV и брзине до 25 km/s. На основу ових закључака, спроведен је низ истраживања фокусираних на уништавање експлозивних средстава помоћу ЕГП [11].

Спроведена су истраживања која се односе на понашање ЕГП, студије о његовој проводљивости [6], утицају магнетних поља на његово понашање, његовом емисионом спектру [9] [13], интеракцији при судару са другим ЕГП [11] и његовој густини електрона [15] [5].

Закључено је да експлозивно генерисана плазма настаје када детонациони талас напушта површину експлозива и улази у околни гасни медиј. Овако настала плазма представља јонизујући гас високе температуре (реда величине од 1 eV) и брзине, која иде испред фронта детонационог таласа. Ова плазма је веома нестабилна и распада се веома брзо (неколико стотина нано секунди). Спроведеним експериментима доказано је да се она може стабилизovati и њено постојање (време распада) продужити на стотине микросекунди, како би се енергија плазме искористила [5].

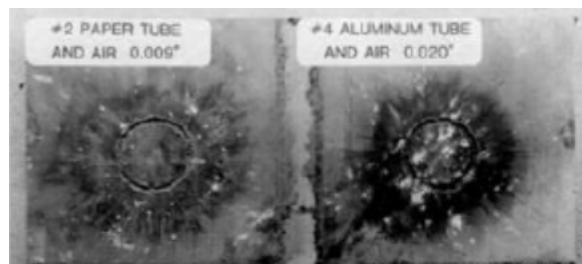
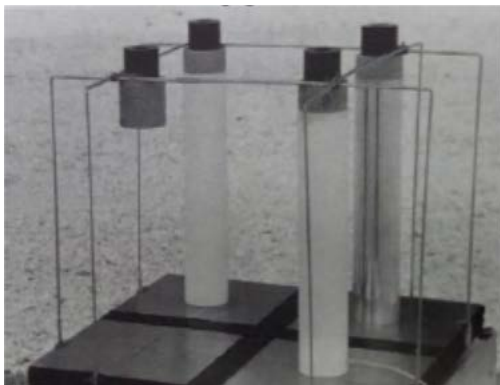
Стабилизација ЕГП постиже се усмеравањем детонационог таласа кроз цев, а оптимизацијом геометрије цеви регулише се ударна брзина плазме.

У доступној литератури, измерене су излазне брзине ЕГП које варирају између 6 km/s и 14 km/s за плазму усмерену кроз цилиндричну цев, док су за конусне цеви измерене брзине које достижу до 25 km/s. Дакле, променом геометрије од цилиндричне на конусну цев достигнуте су много веће брзине плазме на излазима цеви. Претходно наведено доводи до закључка да ће ефекат ЕГП приликом удара у неку баријеру (материјал) бити много већи употребом цеви конусне геометрије [5] [11].



Слика 2. Пролазак ЕГП кроз РММА цев и напуштање цеви [5].

У експерименту, спроведеном од стране групе истраживача [16], експлозивна пуњења су била постављена на врху цилиндричних папирних или алуминијумских цеви испуњених ваздухом или аргоном, а цеви су стајале на челичној плочи. Референтно експлозивно пуњење је било окачено на истој удаљености као и остала пуњења, али без цеви испод њега. Референтно пуњење није оштетило челичну плочу уопште; међутим, пуњења која су стајала на цевима су створила круг где је цев додирнула челик. Пречник ових кругова је био приближно исти као пречници цеви, а челик изван и унутар кругова је био једва оштећен. Он је ове резултате назвао „мистериозним ефектима“ детонације експлозива.



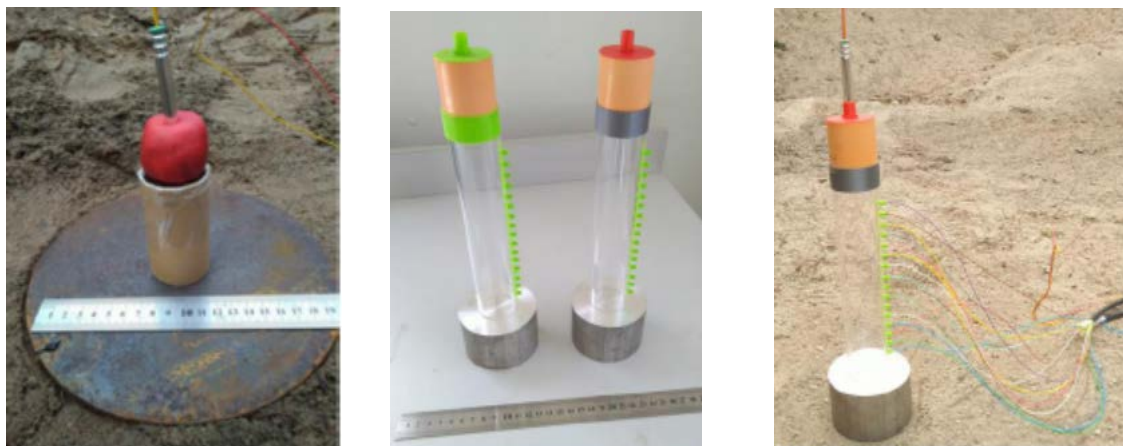
Слика 3. Експериментална поставка (лево) и резултат „мистериозног“ ефекта (десно) [16].

Потврђено је да ЕГП не оштећује цев кроз коју пролази, већ њено оштећење настаје услед продуката детонације који иду иза плазме.

Како би увидели ефекте усмерене ЕГП приликом удара у челични материјал, тим истраживача [5], спровео је истраживање у ком су мењали геометрију цеви кроз које пролази ЕГП, сагледавајући излазне брзине ЕГП и облике оштећења које направи ЕГП на челичној плочи.

Њихови експерименти сагледавали су наведене карактеристике кроз низ тестова: *Initial paper tube tests*, *Tests with PMMA tube*, *Conical geometry experiments* и *Optimization of conical geometries*.

На слици 4, приказане су поставке *Initial paper tube test* и *test with PMMA tube* који обухватају референтно експлозивно пуњење постављено на одређену дистанцу од челичне плоче тако да правас детонационог талас који генерише ЕГП буде паралелан са осом симетрије цеви и управан на референтну челичну плочу.



Слика 4. Сlike експерименталних поставки: *the initial tests* (лево), *the PMMA tube experiment with aluminium witness block* и оптички кабли за мерење брзине детонације (средина и десно) [5]

Као што се види на слици 4, спроводећи *Initial paper tube test* изведен је закључак да је референтна челична плоча била видљиво кружно полирана на месту где је цев постављена, али без видљивог оштећења. Затим је одлучено да се за референтну плочу користи дуктилнији материјал (бакар и алуминијум), а референтна плоча је стајала на подлози од другог материјалу (песак, челик, дрво). Ово је резултовало да нове референтне плоче имају видљива оштећења. Оне направљене од бакра имале су дефинисаније кругове, оне стављене на челичну позадину, имале су одређени отпор који се вратио и секундарно уништио плочу, као што је на слици 4 (десно) алуминијумска плоча извијена нагоре услед секундарног дејства.



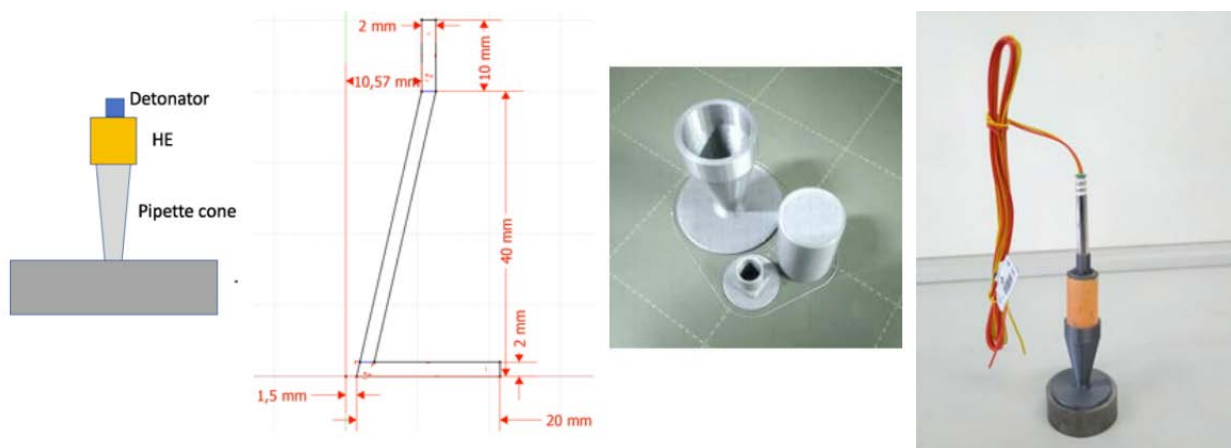
Слика 5. Сlike спроведеног експеримента са различитим плочама и подлогама. Челична контролна плоча (лево), бакарни лим на песку (середина) and алуминијумски лим на челику (десно). [5]

На слици 5, приказано је оштећење настало на алуминијумској референтној плочи услед *test with PMMA tube*.



Слика 6. Образац оштећења изазван „мистериозним ефектом“ на алуминијумском контролном блоку, који је резултат експеримента са PMMA цевима [5].

Даљим радом, *Stepan Jirman* и његов тим, спровели су *Conical geometry experiments*, водећи плазму кроз цеви конусног облика у циљу добијања веће пробојности референтне плоче. Конусне цеви имале су облик и димензије као што је приказано на слици 6.



Слика 7. Скица експерименталне поставке коју је предложио Б. Тапан (лево), димензије и 3D модел (у средини), и 3D штампани конусни елемент са високобризантним експлозивним пуњењем и детонатором [5].

Овај експеримент показао је да се употребом конусне цеви ЕГП концентрише у једну тачку што резултује много већом пробојношћу.

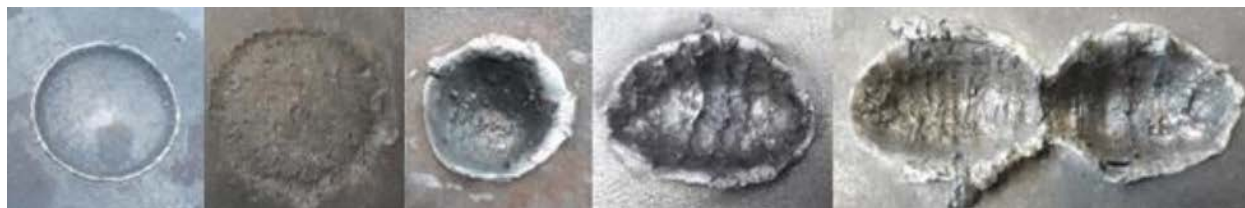


Слика 8. Резултујући обрасци оштећења конусних геометрија. Удубљење у челику (лево), удубљење у алуминијуму и његов детаљ (десно) [5].

Како би се пробојност максимално повећала, истражни тим је оптимизовао конусну геометрију цеви мењајући њене димензије. Из резултата приказаних у табели 3.1 може се видети да је најдубља пенетрација референтне плоче достигнута са поставком експеримента број 11, табеле 3.2, где је цев конусног облика са растојањем од 4 cm и излазном рупом цеви пречника 2 mm. Максимална брзина ЕГП достигнута је при растојању од 3 cm и њена вредност је износила 11,3 km/s. Разлика у пречнику излазне рупе није имала темељније ефекте код конусних геометрија, али је био значајан фактор код геометрија за сечење. Ово би могло указивати на могуће постојање идеалне површине излазног отвора [5]

Табела 2. Збирна табела облика и величина постављених експеримената [5].

Бр. експеримента	Облик елемента	Одстојање (cm)	Пречник излазне рупе / ширина реза (mm)
1	-	0	Само експ. пуњење на челику
2	Конусни	15	3
3	Конусни	10	3
4	Праволинијски	5	21
5	Конусни	5	3
6	Сечивни	5	3
7	Сечивни	5	2
8	Сечивни	5	1
9	Двоструки сечивни	5	3
10	Конусни	4	3
11	Конусни	4	2
12	Конусни	4	1
13	Конусни	3	3
14	Конусни	3	2
15	Конусни	3	1
16	Конусни	2	3



Слика 9. Поређење образаца оштећења на челичној сведок-плочи. Следећи елементи су поређани слева надесно: пуњење у директном контакту са челиком (1), праволинијски елемент (4), конусни елемент (5), геометрија за „сечење“ (8) и „двострука“ геометрија за сечење (9). [5]

Табела 3. Табела са збирним приказом резултата експеримената оптимизације [5].

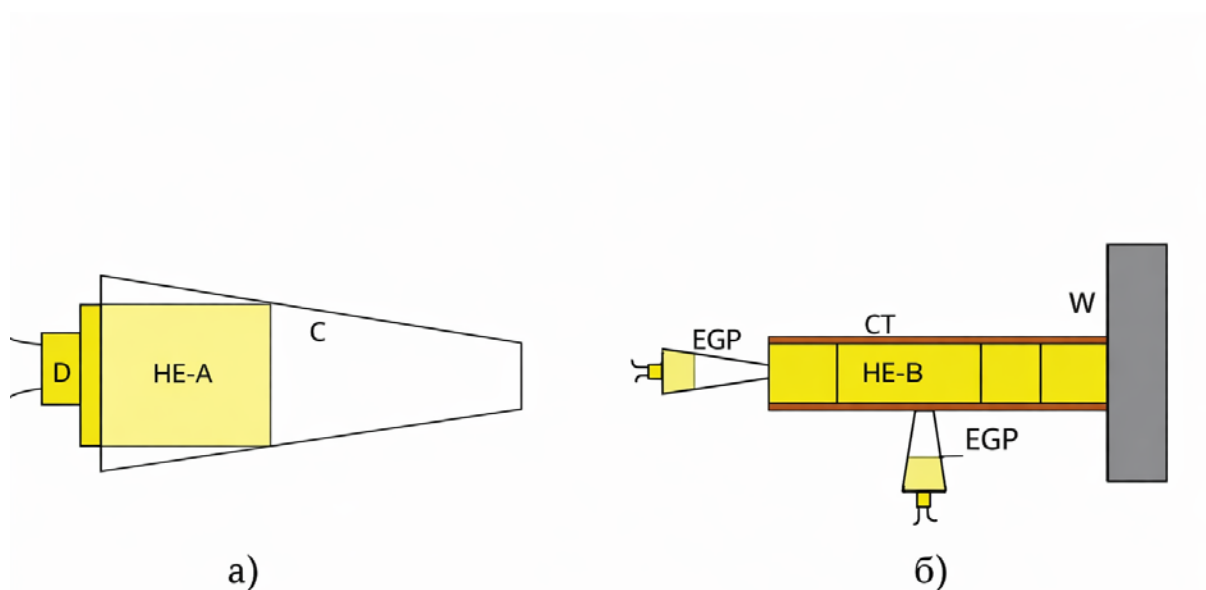
Бр. експеримента	Просечна брзина EGP (km/s)	Дубина продора/оштећења (mm)	Ширина продора/оштећења (mm)	Напомена
1	x	3	28	Одљусак на супротној страни
2	7,87	10,5–4,5	12	Од 4 хица, дубина 2×10,5 и 2×4,5 mm
3	8,59	10,5	12,5	-
4	7,52	1	3	Једва видљив удубљен круг
5	9,03	14	18	-
6	Није мерено	5	22,5–13	Однос дужина–ширина
7	Није мерено	7,5	22,5–13	Однос дужина–ширина
8	Није мерено	13	23,5–15	Однос дужина–ширина
9	Није мерено	5,5–10	40–17–7	Вредности 5,5 и 7 су у најтањој зони оштећења
10	10,3	14,2	18	-
11	10,3	14,6	18	-
12	10,2	12,3	18	-
13	11,1	12,5	16,5	-
14	11,3	11	17,5	-
15	9,94	10	17,5	-
16	8,41	9,7	13,5	-

Такође, извршен је и експеримент који је доказао да уколико се експлозивно пуњење постави тако да правац детонационог таласа који генерише ЕГП буде нормалан на правац цеви кроз коју пролази ЕГП, добијени резултати ефекта дејства ЕГП ће бити скоро идентични резултатима добијених у претходним експериментима.

Топлотни флуks који делује на циљане површине процењује се на 1 до 10 GW/m², а оштећења мета могу бити у корелацији са овим термалним ефектима [11]

У истраживачком раду [11], доказано је да се ЕГП може искористити за безбедно („бенигно“) онеспособљавање убојних средстава која су лабораторисана високо бризантним експлозивом, као и да је могуће прекинути текућу детонацију циљаног експлозивног пуњења помоћу ЕГП.

Приликом испитивања прекида текуће детонације експлозивног пуњења помоћу ЕГП, ЕГП је увек активиран први како би се оставило довољно времена да плазма поремети циљни експлозив. Као почетна тачка, плазма генератор је активиран 25 μ s пре детонатора високобризантног експлозива.



Слика 10. (а) ЕГП који приказује RP-1 детонатор (D); експлозивну пастилу (HE-A); Имхофов конус (C). (б) Експериментални склоп са бакарном цеви (СТ); циљним експлозивним пастилама (HE-B); челичном сведок-плочом (W); и ЕГП-ом постављеним са стране или на крају бакарне цеви [11].

Табела 4. Резиме експеримената прекидања детонације [11].

Димензије EGP (mm)	Број EGP	Позиција EGP	Кашњење детонације (μs)	Детонација	Напомена
12,7×12,7	1	Бочно	25	Да	Пуна детонација
25,4×25,4	1	Бочно	25	Да	Пуна детонација
25,4×25,4	1	Бочно	50	Да	Плазма није пробила удаљени зид цеви пре детонације. Пуна детонација.
12,7×12,7	2	Супротне стране	60	Да	Конвергентна плазма можда је иницирала НЕ
25,4×25,4	1	Бочно	60	Не	Детонација зауостављена
25,4×25,4	1	Бочно	60	Не	Детонација зауостављена

4. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНО ИСТРАЖИВАЊЕ И ДИСКУСИЈА РЕЗУЛТАТА

Извршено је испитивање дејства ЕГП на челично тело минобацачке мине калибра 82 mm и артиљеријске кумулативне гранате калибра 100 mm М69. Неки експерименти су се бавили дејством ЕГП на чауру од месинга и танку челичну плочу. За потребе експеримента [17] коришћене су цилиндричне цеви од полипропилена (PP-RCT – полипропиленски рандом кополимер са модификованом кристаличношћу и отпорношћу на температуру) као дистанцери од експлозивног пуњења. Пречник и дужина коришћених ПП цеви приказани су у Табели 5.

Табела 5. Димензије ПП цеви.

Ознака	Дужина (mm)	Унутрашњи пречник (mm)	Спољни пречник (mm)
K1	100	13	20
K2	100	17	25
K3	100	25	40
D1	150	13	20
D2	150	17	25
D3	150	25	40

У експерименту су коришћени и конусни метални дистанцери чије су димензије дате у табели 6.

Табела 6. Димензије металних конуса.

Ознака	Дужина (mm)	Горњи пречник (mm)	Доњи пречник (mm)
C1	112	23	15
C2	120	28	3

Експлозивна пуњења су израђена од пластичног експлозива PPE-01, масе 20 и 100 грама. Поставке експеримената су приказане на сликама 11, 12 и 13.



Слика 11. Изглед постављених дистанцера на тело мине 82 mm.



Слика 12. Изглед постављених дистанцера на кошуљицу кумулативне гранате 100 mm и танак челични лим.



Слика 13. Изглед постављених дистанцера на данце месингане чауре 76 mm.

Резултати дејства ЕГП на различите објекте су приказани у табели 7.

Табела 7. Резултати дејства ЕГП на различите објекте.

Ознака експеримента	Врста дистанцера	Маса експлозива (g)	Врста објекта	Резултат
E1	C1	20	82 mm	Удубљење
E2	K2	20	82 mm	Нема дејства
E3	K1	20	Чаура плашт	Пробој
E4	K1	20	Чаура данце	Нема дејства
E5	K3	20	100 mm	Удубљење
E6	K3	100	100 mm	Пробој
E7	K3	100	82 mm	Удубљење
E8	K1	20	Челични лим	Пробој
E9	C1	100	100 mm	Пробој
E10	C2	100	82 mm	Пробој
E11	K2	100	Челични лим	Пробој
E12	D3	100	Чаура данце	Нема дејства

Краће ПП цеви и метални конуси показали су се успешним чак и са мањом количином експлозивног пуњења. Кошуљице муниције калибра 82 mm и 100 mm успешно су пробијене применом ЕГП. Краће ПП цеви су показале боље резултате у односу на дуже. Данце месингане чауре није било могуће пробити применом ЕГП. Типични ефекти дејства ЕГП на дате објекте су приказани на сликама 14, 15 и 16.



Слика 14. Дејство ЕГП на тело мине 82 mm. Лево експеримент Е10 и десно Е7.



Слика 15. Дејство ЕГП на кошуљицу гранате 100 mm. Лево експеримент Е6 и десно Е5.



Слика 16. Дејство ЕГП на челични лим и месингану чауру. Лево Е8 и Е11, у средини Е3 и десно Е12.

ЗАКЉУЧАК

Неексплодирана убојна средства представљају један од најозбиљнијих дугорочних безбедносних проблема у подручјима захваћеним оружаном сукобом. Њихово присуство угрожава људске животе, посебно децу и цивилно становништво и значајно ограничава безбедну употребу земљишта. Класичне методе њиховог уклањања и уништавања, које се најчешће заснивају на механичком разарању или контролисаној детонацији, носе висок степен ризика и могу довести до неконтролисаних последица по људе и околину. Из тог разлога, развој нових, бенигнијих приступа представља важан научни и инжењерски задатак.

У овом раду анализирана је могућност примене експлозивом генерисане плазме као механизма за безбедније уништавање неексплодираних убојних средстава. Показано је да експлозивом генерисана плазма представља краткотрајно, али интензивно неравнотежно стање материје, које се одликује високом електронском густином, малом Дебајевом дужином и снажним електромагнетним ефектима. Управо ове карактеристике омогућавају дејство на експлозивне материјале путем електронских и електромагнетних механизма. Дејство ЕГП на различите материјале, уз примену дистанцера израђених од различитих материјала и облика, као и са различитим масама експлозивног пуњења, показало је да се овај ефекат може искористити за пробијање кошуљица муниције и других различитих материјала, што указује на могућност његове примене у уништавању неексплодираних убојних средстава *in situ*. Додатна испитивања требало би спровести на муницији са експлозивним пуњењем, пожељно уз употребу металног дистанцера конусног облика.

Посебан значај експлозивом генерисане плазме огледа се у могућности прекида детонационог ланца и деактивације осетљивих компоненти убојних средстава. Истраживања показују да плазмено дејство може довести до деградације иницијалних и детонаторских склопова, измене осетљивости експлозивног пуњења и локалне хемијске или електронске дестабилизације материјала што доводи до губитка способности УБС да поуздано детонира. Тиме се постиже бенигно уништавање, односно, неутрализација убојног средства.

За разлику од класичних метода, експлозивом генерисана плазма делује локализовано и временски ограничено, што значајно смањује ризик по околину и омогућава прецизнију контролу процеса. Временско раздвајање плазмених ефеката од

механичког ударног таласа додатно наглашава потенцијал ове методе за селективно дејство, усмерено превасходно на електронске и електромагнетне аспекте експлозивног система.

Ипак, рад је такође указао на ограничења овог приступа. Кратко трајање плазмене фазе, осетљивост на услове околног медија и потреба за пажљивом оптимизацијом геометрије и параметара представљају значајне изазове за практичну примену. Због тога је неопходан даљи развој експерименталних и нумеричких модела, као и детаљна систематична испитивања интеракције експлозивом генерисане плазме са различитим типовима експлозивних материјала и конструкција убојних средстава.

Будући развој и примена експлозивом генерисане плазме требало би да буду усмерени ка развоју контролисаних и поузданих система за бенигно уништавање неексплодираних убојних средстава. Потенцијалне примене и развој технологије укључују интеграцију са постојећим процедурама разминирања, као и даље проширење знања о плазменим ефектима у екстремним условима. На тај начин, експлозивом генерисана плазма може постати важан алат у смањењу ризика по људске животе и допринети развоју безбеднијих и хуманијих технологија у области уништавања НУС.

СПИСАК КОРИШЋЕНЕ ЛИТЕРАТУРЕ

- [1] **Chen, Francis F.** *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. 3. s.l. : Springer Cham.
- [2] **T. J. M. Boyd, J. J. Sanderson.** *The Physics of Plasmas*. s.l. : Cambridge University Press, 2010.
- [3] **A. Bauer, M. A. Cook, R. T. Keyes.** Detonation-Generated Plasmas. *Proceedings of the Royal Society*. 1961, 259, стр. 508-517.
- [4] **Cook, Melvin A.** *The Science of High Explosives*. Huntington, New York : Robert E. Krieger Publishing Co. Inc., 1958.
- [5] **Stepan Jirman, Jiri Pachman, Jakub Selesovsky, Jindrich Kucera.** Study of explosion-generated plasma, it's velocity and. *New Trends in Research of Energetic Materials*. 2024.
- [6] **Melvin A. Cook, Robert T. Keyes, Lex L. Udy.** Propagation Characteristics of DetonationGenerated Plasmas. *Journal of Applied Physics*. 1959, 30.
- [7] **A. Bauer, M.A. Cook, L.A. Rogers.** Ionization waves from free surfaces of detonating explosives. *Department of Metallurgy, Institute of Metal and Explosives Research*. 1961.
- [8] **Melvin A. Cook, William S. McEwan.** Cohesion in Plasma. *Journal of Applied Physics*. 1958, 29.
- [9] **Christopher J. Boswell, Patrick D. O'Connor.** Charged particle motion in an explosively generated ionizing shock. *AIP Conference Proceedings*. 2009, 1195.
- [10] **Drude, P. K. L.** Zur Elektronentheorie der Metalle. *Annalen der Physik*. 2006, стр. 687-692.
- [11] **Douglas G. Tasker, Von H. Whitley, Carl E. Johnson.** The interaction of explosively generated plasma with explosives. *American Institute of Physics*. 2017.

- [12] **Andrey Starikovskiy, Nickolay Aleksandrov and Aleksandr Rakitin.** Plasma-assisted ignition and deflagration to detonation transition. *The Royal Society*. 2012, стр. 740-773.
- [13] **N. Poirier, D. Amondson, B. W. Asay, N. Glumac.** Spatial and spectral structure of explosively generated plasmas. *Shock Waves*. 2021, стр. 877-886.
- [14] **Raizer, Yuri P.** *Gas Discharge Physics*. [yp.] John E. Allen. 1. s.l. : Springer Berlin, Heidelberg, 1991.
- [15] **Chen, H., и други.** Measurement of Time-Varying Electron Density of the Plasma Generated from a Small-Size Cylindrical RDX Explosion by Rayleigh Microwave Scattering. *Plasma Sci. Technol.* 2021.
- [16] **Davis, W. C. и Hill, L. G.** Points, Cracks, Holes, and Gaps in Detonating Explosives. *Proceedings of the Twelfth International Detonation Symposium 2002*. стр. 220-229.
- [17] **Zoran Bajić, Petar Radovanović, Branislav Jovanović, Jovica Bogdanov** Effects of the explosion-generated plasma on the ammunition shell. *Proceedings of the New Trends in Research of Energetic Materials*. 2025.

СПИСАК СЛИКА

Слика 1. Низ слика простирања ЕГП кроз РММА цев (лево) и изласка ЕГП из цеви (десно) [5]	10
Слика 2. Пролазак ЕГП кроз РММА цев и напуштање цеви [5].....	51
Слика 3. Експериментална поставка (лево) и резултат „мистериозног“ ефекта (десно) [16].....	51
Слика 4. Сlike експерименталних поставки: <i>the initial tests</i> (лево), <i>the РММА tube experiment with aluminium witness block</i> и оптички каблови за мерење брзине детонације (средина и десно) [5].....	52
Слика 5. Сlike спроведеног експеримента са различитим плочама и подлогама. Челична контролна плоча (лево), бакарни лим на песку (средина) and алуминијумски лим на челику (десно). [5].....	53
Слика 6. Образац оштећења изазван „мистериозним ефектом“ на алуминијумском контролном блоку, који је резултат експеримента са РММА цевима [5].	53
Слика 7. Скица експерименталне поставке коју је предложио Б. Тапан (лево), димензије и 3D модел (у средини), и 3D штампани конусни елемент са високобризантним експлозивним пуњењем и детонатором [5].	54
Слика 8. Резултујући обрасци оштећења конусних геометрија. Удубљење у челику (лево), удубљење у алуминијуму и његов детаљ (десно) [5].	54
Слика 9. Поређење образаца оштећења на челичној сведок-плочи. Следећи елементи су поређани слева надесно: пуњење у директном контакту са челиком (1), праволинијски елемент (4), конусни елемент (5), геометрија за „сечење“ (8) и „двострука“ геометрија за сечење (9). [5]	55
Слика 10. (а) ЕГП који приказује RP-1 детонатор (D); експлозивну пастилу (HE-A); Имхофов конус (C). (b) Експериментални склоп са бакарном цеви (CT); циљним експлозивним пастилама (HE-B); челичном сведок-плочом (W); и ЕГП-ом постављеним са стране или на крају бакарне цеви [11].	57
Слика 11. Изглед постављених дистанцера на тело мине 82 mm.	60
Слика 12. Изглед постављених дистанцера на кошуљицу кумулативне гранате 100 mm и танак челични лим.	60

Слика 13. Изглед постављених дистанцера на данце месингане чауре 76 mm.	61
Слика 14. Дејство ЕГП на тело мине 82 mm. Лево експеримент Е10 и десно Е7.	62
Слика 15. Дејство ЕГП на кошуљицу гранате 100 mm. Лево експеримент Е6 и десно Е5.	62
Слика 16. Дејство ЕГП на челични лим и месингану чауру. Лево Е8 и Е11, у средини Е3 и десно Е12.	62

СПИСАК ТАБЕЛА

Табела 1. Карактеристични параметри експлозивом генерисане плазме.....	48
Табела 2. Збирна табела облика и величина постављених експеримената [5].	55
Табела 3. Табела са збирним приказом резултата експеримената оптимизације [5].	56
Табела 4. Резиме експеримената прекидања детонације [11].....	58
Табела 5. Димензије ПП цеви.	59
Табела 6. Димензије металних конуса.	59
Табела 7. Резултати дејства ЕГП на различите објекте.	61