

Форензика експлозије кондензованих материја

Никола Митровић, Милан Јовановић, Милица Јанковић и Радован Радовановић

Апстракт: Експлозија кондензованих материја представља опасност по човека и околину, те је од важности предвидети ризик од настајања исте и управљати могућим последицама. У оквиру рада приказан је прорачун притиска ударног таласа експлозије кондензованих материја и анализа последица по човека. За анализу изабране су материје са различитом енергијом топлотне моћи. Приказане су упоредна анализа тока прорачуна импулс фаза сабијања и пробит функције. Утврђено је растојање са ког неће бити последица по човека и околину.

Кључне речи: експлозија; импулс фаза сабијања; притисак ударног таласа; пробит функција.

I. Увод

Главна сврха овог истраживања је да се изврши анализа различитих експлозивних материја, при чему је фокус стављен на њихову енергију експлозије и притисак таласног удара. Циљ је да се одреди безбедно растојање од експлозије, при чему ће се узети у обзир могући нежељени ефекти за човека, као што су претња по живот и здравље, штете на имовини и окружењу итд. Правилно одређивање безбедног растојања може бити од велике важности у различитим областима.

Карактеристике експлозије кондензованих материја је да производи енергију у облику топлоте, ствара експлозивне продукте, високе температуре и ударни талас са повећаним притиском, који генерише ваздушну струју са фазама сабијања (I_+) и разређивања (I_-) ваздуха [1]. Експлозија може да изазове пожаре, рушење објеката, разлетање оштећеног материјала, изливање опасних материјала и њихово ширење у ваздух у експлозивној концентрацији [4].

Главне карактеристике ударног таласа су натпритисак који се јавља на фронту ударног таласа и трајање импулса [2]. Вредности ових карактеристика зависе од различитих фактора, као што су врста експлозива, маса експлозива и удаљеност од места експлозије [2].

Изабране су четири различите врсте кондензованих материја (хексоген, октоген, нитроглицерин и тетрил), за анализу ефекта експлозије. Маса експлозива која ће бити

коришћена износи 30 тона, а растојање од експлозије до најближег човека је 100 метара.

II. ПРОРАЧУН ПРИТИСКА УДАРНОГ ТАЛАСА И ИМПУЛС ФАЗА САБИЈАЊА

Табела I приказује вредности енергије експлозије за материје које су испитиване.

ТАБЕЛА I
ВРЕДНОСТИ ЕНЕРГИЈА ЕКСПЛОЗИЈЕ ДАТЕ МАТЕРИЈЕ

Експлозивна материја	Q_e [kJ/kg]
Тротил	4520 kJ/kg
Хексоген	5360 kJ/kg
Октоген	5860 kJ/kg
Нитроглицерин	6700 kJ/kg
Тетрил	4500 kJ/kg

Јачина експлозије се мери у односу на снагу експлозије референтног материјала, обично ТНТ (тринитротолуол - тротил), одређујући количину енергије која се ослобађа при експлозији у поређењу са ТНТ-ом [1]. Када се каже "еквивалент тротила", то се односи на масу ТНТ експлозивног пуњења, код којег се ослобађа иста количина енергије као и при експлозији датог експлозивног пуњења масе [3]. Масу еквивалентног тротила можемо израчунати применом формуле (1).

$$m_{TNT} = \frac{Q_e}{Q_{e,TNT}} \cdot m \quad (1)$$

где су:

Q_e - енергија експлозије дате материје,

$Q_{e,TNT}$ - енергија експлозије тротила,

m - маса дате материје.

Остварени резултати за масу експлозивног пуњења приказани су у табеларном облику у Табели II.

ТАБЕЛА II
ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ МАСЕ ЕКСПЛОЗИВНОГ ПУЊЕЊА

Експлозивна материја	m_{TNT} [kg]
Хексоген	35575 kg
Октоген	38893 kg
Нитроглицерин	44469 kg
Тетрил	29867 kg

Никола Митровић – Криминалистичко - полицијски универзитет, Цара Душана 196, 1100 Београд, Србија (e-mail: nikola.mitrovic@kpu.edu.rs) (<https://orcid.org/0000-0001-5970-2654>).

Милан Јовановић – Криминалистичко - полицијски универзитет, Цара Душана 196, 1100 Београд, Србија (e-mail: mjanmilan9@gmail.com).

Милица Јанковић – Криминалистичко - полицијски универзитет, Цара Душана 196, 1100 Београд, Србија (e-mail: jankovicmilica095@gmail.com).

Радован Радовановић – Криминалистичко - полицијски универзитет, Цара Душана 196, 1100 Београд, Србија (e-mail: radovan.radovanovic@kpu.edu.rs).

Након експлозије, настаје ваздушни ударни талас који генерише повећани притисак у окружењу, импулса фазе сабијања и импулса фазе разређивања. При притиску ударног таласа од 30 kPa, брзина кретања ваздушне масе је 63,2 m/s. Користећи формуле, могуће је израчунати притисак ударног таласа који се јавља у кондензованим материјалима [2]. Конкретно, применом формуле (2) може се израчунати натпритисак (ΔP) (изражен у килопаскалима) на фронту сферног ваздушног ударног таласа који се слободно шири при експлозији кондензованих експлозивних материјала [1].

$$\Delta P = k_1 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_{TNT}}}{R} + k_2 \cdot \frac{\sqrt[3]{m_{TNT}^2}}{R^2} + k_3 \cdot \frac{m_{TNT}}{R^3} \quad (2)$$

где су:

m_{TNT} - маса експлозивног пуњења у килограмима,

R - удаљеност од центра експлозије у метрима,

k_1, k_2, k_3 - емпиријски коефицијенти који зависе од врсте експлозије.

За експлозију кондензованих материја усвајају се вредности емпиријских коефицијената $k_1=95$; $k_2=390$; $k_3=1300$.

Утицај притиска ударног таласа, насталог при експлозији до 10 kPa безбедно је за човека, од 20 до 40 kPa слаб утицај (уганућа, модрице, привремен губитак слуха), од 40 до 60 kPa средњи утицај (контузија мозга, повреда органа чула слуха, пуцање бубних опни, крварење из носа и ушију), од 60 до 100 kPa јак утицај (јака контузија целог организма, губитак свести, преломи екстермитета, повреда унутрашњих органа), од 100 kPa праг леталног утицаја [3].

Остварени резултати притиска таласног удара дати су у Табели III:

ТАБЕЛА III
ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ ПРИТИСКА ТАЛАСНОГ УДАРА

Експлозивна материја	ΔP [kPa]
Хексоген	119,67 kPa
Октоген	127,51 kPa
Нитроглицерин	140,41 kPa
Тетрил	105,85 kPa

Формула (3) користи се за оријентациони прорачун, помоћу које се израчунава величина импулса фазе сабијања I_+ (изражена у килопаскалима на секунду) на удаљености R од епицентра експлозије.

$$I_+ = \frac{0.4 \cdot \sqrt[3]{m_{TNT}^2}}{\sqrt{R}} \quad (3)$$

где су:

m_{TNT} - маса експлозивног пуњења у килограмима,

R - удаљеност од центра експлозије у метрима,

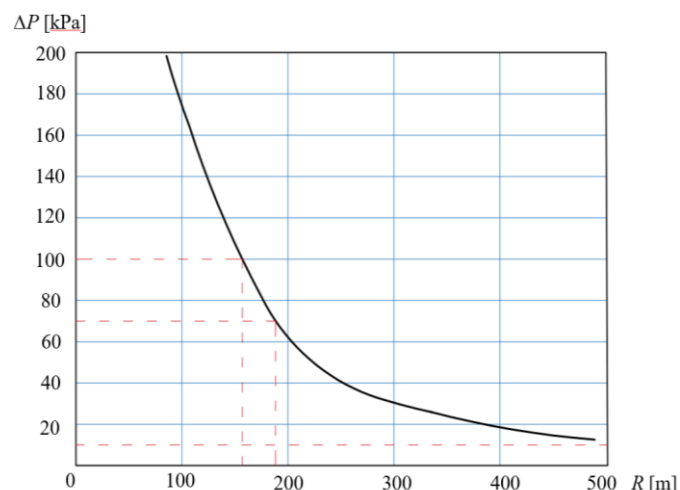
Остварени резултати импулса фазе сабијања дати су у Табели IV:

ТАБЕЛА IV
ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ ИМПУЛСА ФАЗЕ САБИЈАЊА

Експлозивна материја	I_+ [kPa·s]
Хексоген	43,26 kPa·s
Октоген	45,91 kPa·s
Нитроглицерин	50,02 kPa·s
Тетрил	38,50 kPa·s

III. ОДРЕЂИВАЊЕ ПРОБИТ ФУНКЦИЈЕ

На основу дијаграма Сл. 1, могуће је графички одредити радијусе зона које представљају потенцијалну опасност по живот и здравље људи. Према овом дијаграму, може се видети да за леталну повреду $\Delta P = 100$ kPa радијус зоне износи 165 m, за јаку контузију $\Delta P = 70$ kPa радијус зоне износи 190 m, док је за безбедну зону $\Delta P = 10$ kPa радијус зоне 510 m [1].



Сл. 1. Зависност натпритиска од растојања експлозије

За израчунавање вероватноће погинутих под дејством негативног утицаја ваздушног ударног таласа на човека, примењује се формула за пробит функцију (4), (5) и (6), која се заснива на Табели VII. Када се оцењује утицај ваздушног ударног таласа на објекте, степен њиховог оштећења може бити слаб, средњи, велики или потпун.

Коришћењем формуле (6) можемо израчунати вероватноћу пробит функције у случају леталне повреде, док се вероватноћа јаке контузије може одредити користећи формулу (5). За израчунавање безбедног растојања може се користити формула (4).

$$P_r = -12,6 + 1,524 \cdot \ln \Delta P \quad (4)$$

$$P_r = 5 - 5,74 \cdot \ln \left(\frac{4,2}{1 + \frac{\Delta P}{P_o}} + \frac{I_+}{\sqrt{P_o} \cdot \sqrt[3]{m}} \right) \quad (5)$$

$$P_r = 5 - 2,44 \cdot \ln \left(\frac{7,38}{\Delta P} + \frac{1,9 \cdot 10^3}{\Delta P \cdot I_+} \right) \quad (6)$$

где су:

m - маса тела у килограмима,

ΔP - притисак таласног удара у килопаскалима,

I_+ - импулс фаза сабијања у килопаскалима на секунд,

P_o - атмосферски притисак у килопаскалима.

Неопходно је утврдити о којем типу зона је реч - да ли је у питању летална повреда, јака контузија или се ради о безбедном растојању. Одабир тог типа зоне одређује се коришћењем дијаграма Сл. 1, које су засноване на притиску таласног удара. У овој анализи прихватамо да се ради о леталним повредама за материје које су изабране за испитивање. Резултате нашег истраживања добијамо користећи формулу (6).

Остварени резултати који су добијени за пробит функцију приказани су у табеларном облику Табелу V.

ТАБЕЛА V
ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ ПРОБИТ ФУНКЦИЈЕ ЗА ЛЕТАЛНЕ ПОВРЕДЕ

Експлозивна материја	P_r
Хексоген	7,06
Октоген	7,34
Нитроглицерин	7,76
Тетрил	6,52

У Табелу V су представљени остварени резултати пробит функције за хексоген, октоген и нитроглицерин. Како би разумели вероватноћу настанка последица по човека, потребно је да прочитамо резултате у Табелу VII и применимо их на конкретну ситуацију. Пробит функција је математички модел који се користи да би се предвиделе последице експлозије у различитим условима. Она је мерило вероватноће да ће се неки догађај десити, као што је на пример, настајање последица по људски живот. Очитавањем резултата у Табелу VII, можемо да утврдимо вероватноћу настанка последица по човека на основу различитих фактора, као што су удаљеност од експлозије, количина експлозива и сл.

Вероватноћа леталног исхода по човеку при експлозији кондензованих материја приказана је у Табелу VI, а ова информација је од кључног значаја за безбедан рад са оваквим материјама.

ТАБЕЛА VI
ОСТВАРЕНИ РЕЗУЛТАТИ ПРОБИТ ФУНКЦИЈЕ ЗА ЛЕТАЛНЕ ПОВРЕДЕ

Експлозивна материја	%
Хексоген	98,0
Октоген	99,0
Нитроглицерин	99,7
Тетрил	94,0

Добијени резултати истраживања пружају важне информације о вероватноћи леталности по особу за кондензоване материје попут хексогена, октогена, нитроглицерина и тетрила. Према овим резултатима, највиша вероватноћа леталности је код нитроглицерина (99,7%), средња је код октогена (99%), док је најнижа код хексогена (98%) и тетрила (94%). Ови подаци су кључни у процени безбедности у случају незгода и указују на потребу строге примене сигурносних протокола при руковању овим материјама. Такође, ови резултати могу послужити као основа за даља истраживања у циљу развоја нових и сигурнијих метода руковања кондензованим материјама и смањења ризика по живот и здравље људи и околине.

У Табелу VII [1] су представљене вредности које илуструју вероватноћу настанка различитих догађаја. Овај податак је од великог значаја за процену ризика и безбедности у различитим ситуацијама. На основу ових вредности, можемо донети важне закључке и препоруке за безбедност у различитим окружењима.

ТАБЕЛА VII
КОЕФИЦИЈЕНТИ ОДРЕЂИВАЊА ВЕРОВАТНОЋЕ НАСТАНКА ДОГАЂАЈА

%	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	—	2,67	2,95	3,12	3,25	3,38	3,45	3,52	3,59	3,66
10	3,72	3,77	3,82	3,87	3,92	3,96	4,01	4,05	4,08	4,12
20	4,16	4,19	4,23	4,26	4,29	4,33	4,36	4,39	4,42	4,45
30	4,48	4,50	4,53	4,56	4,59	4,61	4,64	4,67	4,69	4,72
40	4,75	4,77	4,80	4,82	4,85	4,87	4,90	4,92	4,95	4,97
50	5,00	5,03	5,05	5,08	5,10	5,13	5,15	5,18	5,20	5,23
60	5,25	5,28	5,31	5,33	5,36	5,39	5,41	5,44	5,47	5,50
70	5,52	5,55	5,58	5,61	5,64	5,67	5,71	5,74	5,77	5,82
80	5,84	5,88	5,92	5,95	5,99	6,04	6,08	6,13	6,18	6,23
90	6,28	6,34	6,41	6,48	6,55	6,64	6,75	6,88	7,05	7,33
99	7,33	7,37	7,41	7,46	7,51	7,58	7,65	7,75	7,88	8,09

IV. ФОРЕНЗИЧКИ АСПЕКТИ

Форензички аспекти овог истраживања се огледају у примени добијених резултата у току истраге акцидентата са кондензованим материјама. Наиме, будући да је могуће одредити вероватноћу леталности за поменуте кондензоване материје, могуће је и утврдити да ли је руковање материјама било адекватно, то јест, да ли је ситуација схваћена довољно озбиљно. Сходно томе, може се утврдити законска одговорност лица задужених за безбедност.

V. ЗАКЉУЧАК

Резултати истраживања јасно указују на озбиљну претњу коју кондензоване материје представљају по људско здравље и сигурност. Стога је веома важно да се строго придржавамо сигурносних протокола приликом руковања овим материјама, користимо само одговарајуће алате и опрему те да их складиштимо и транспортујемо на прописан начин како бисмо смањили ризик од несрећа и

експлозија.

Осим тога, ови резултати могу послужити као основа за развој нових и сигурнијих начина руковања и употребе кондензованих материја. Даља истраживања у овом подручју могу довести до нових сазнања о понашању ових материја у различитим условима и најбољим начинима њихове употребе, без угрожавања људи и околине. Кључно је спровести даља истраживања и анализирати факторе који утичу на експлозивност кондензованих материја како би се развиле још сигурније и поузданије методе руковања и употребе.

ЗАХВАЛНИЦА

Желели бисмо да изразимо своју захвалност Организационом одбору конференције ЕТРАН 2023 за огроман труд и препознавање форензике као значајне науке. Такође, желимо да се захвалимо на довољном времену за излагање презентације својих истраживања, и на учествовању у размени мишљења са колегама и доприносу науци.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Б. С. Мاستрюков, *Безопасность в чрезвычайных ситуациях*, Издательский центр „Академия“, Москва, 2008.

- [2] А. Кари, М. Милиновић, *Борбено оптерећење вишецевног лансера услед дејства ударног таласа*, Војно технички гласник 1/2018.
 [3] Д. Млађан, *Безбедност у ванредним ситуацијама друго, измењено и допуњено издање*, Криминалистичко – полицијски универзитет, Београд, 2021.
 [4] David R. Redsicker, *Chapter 12: Arson, Fire, Forensic Science*, 2014.

ABSTRACT

An explosion of condensed matter is a hazard for humans and the environment, henceforth, it is imperative to predict the risk of such explosions happening and to manage the consequences.

This article contains the calculation of the pressure of a shockwave of an explosion of condensed matter, as well as an analysis of the consequences for humans. Matter with different calorific value was chosen for analysis. A simultaneous analysis of the calculation of the impulse phase of compression and probit function is shown. The result is the distance from which there will be no consequences for humans and the environment.

Key words: explosion, impulse phase of compression, shockwave pressure, probit function.

Forensic explosion of condensed matter

Nikola Mitrović, Milan Jovanović, Milica Janković i Radovan Radovanović