

SIMULACIJE U POLJU EKSPLOZIVNIH PROCESA

SIMULATIONS IN EXPLOSIVE PROCESSES AREA

Biljana Đokić, *ETŠ Rade Končar, Beograd*
 Milesa Srećković, *Elektrotehnički fakultet, Beograd*
 Minja Dinulović, *Mašinski fakultet, Beograd*
 Radovan Radovanović, *Kriminalističko- policijska akademija, Beograd*
 Željka Tomić, *Iritel AD Beograd*
 Veljko Zarubica, *Direkcija za mere i plemenite metale, Beograd*
 Aleksandar Đurđević, *Institut Vinča*
 Zoran Karastojković, *Viša tehnička akademija Beograd*
 Radovan Gospavić, *Građevinski fakultet, Wessex Institute of Technology, Ashurst Lodge, Southampton UK*

Sadržaj - *Saglasnost teorije i eksperimenata eksplozivnih procesa pripada kategorijama kod kojih se traži visoka pouzdanost. Eksperimenti sa daljinskom kontrolom ili izazivanjem detonacionih procesa predstavljaju jednu od oblasti u kojoj se primenom optičkih metoda može da smanji rizik povezan sa ljudskim faktorom. Simulacije dinamike kad će pojedini zaštitini materijal da dostigne kritične parametre donose razne aproksimacije. U zavisnosti od primene bira se strožiji kriterijum. U radu je data analiza nekih primena lasera u svrhe eksplozivnih procesa. Daće se aspekti preplitanja odnosa laser-eksplozivni proces sa nekoliko strana. Analiziraće se neki softverski paketi, kojima se modeluju procesi u kojima laser dovodi do promene temperature lokalnog suda sa eksplozivnim materijalom. Izborom osnovnih jednačina jednog prilaza daju se rezultati temperaturnih polja. Proračun može da posluži kao metod za modelovanje i nalaženje potrebnih uslova rada lasera za obezbeđenje eksplozivnog procesa.*

Abstract - *The agreement between theory and experiments of explosive processes belongs to a category at which the high reliability is needed. Experiments with remote control and initiation of detonation processes represent such field in which the risk for human factor could be decreased if optical methods are applied. Simulations in dynamics of reaching the critical parameters for different protective materials bring a various approximations. Depending from the application, the stronger criteria could be chosen. The application of some lasers for an explosive process is analyzed in this paper. The interrelations between laser-explosive process will be analyzed from a few sides. Some software packages, for modeling the processes in which the laser brings temperature changes into the container with an explosive material, will be critically analyzed. By choosing the principal equations in one approach, the results of temperature field distribution are given. This calculation may serve as method for modeling and finding the needed conditions of laser action for successful providing an explosive process.*

1. Uvod

„Klasičan” prilaz definiciji eksplozije bi počeo sa: “Eksplozija predstavlja proces vrlo brzog fizičkog ili hemijskog preobražaja sistema, praćen prelaskom potencijalne energije u mehanički rad. Rad je uslovljen brzim širenjem gasova ili para, nezavisno od vremena nastanka (pre ili u toku eksplozije)”.

Osnovno spoljno obeležje svake eksplozije je nagli skok pritiska u sredini oko sistema, koji eksplodira (oko mesta eksplozije) i na ovoj osobini je zasnovano razorno dejstvo eksplozije.

Razmatranjem toplotnih efekata i bilansa, eksplozija bi se definisala kao hemijska i termodinamička pojava, koja obuhvata razlaganje eksplozivne materije i formiranje novih supstanci hemijski i strukturno različitih od prvobitne

materije. Za bilans procesa i energetske ocene mora se znati toplota formiranja svih supstanci, koje učestvuju u procesu (eksplozivne materije i produkti razlaganja) i priroda i stanje produkata razlaganja neposredno po završetku procesa. To je teško precizirati, jer je celoviti proces eksplozivnog razlaganja rezultat više brzih reakcija, koje se odigravaju pod vrlo visokim pritiscima i temperaturama i čiji režim može da se menja značajno od tačke do tačke eksplozivne mase.

“U pomoć” bi trebalo pozvati prvi zakon termodinamike, koji tvrdi da je promena unutrašnje energije jednog sistema pri transformaciji iz ravnotežnog stanja sa unutrašnjom energijom E_1 u novo ravnotežno stanje sa unutrašnjom energijom E_2 , jednaka je toploti Q , koju je sistem apsorbovao, uvećanoj za vrednost rada A ,

koji je nad sistemom izvršila okolna sredina: $E_2 - E_1 = \Delta E = Q + A$ [1-7].

2. Primena lasera u eksperimentima sa eksplozivnim procesima

Primena lasera u vezi sa eksplozivnim procesima se može pratiti po sledećim zadacima:

- Uz elektrooptičke i elektromagnetne efekte učestvuje u formiranju kratkih impulsa za ekspozicione svrhe, u kombinaciji sa brzim kamerama. Ovu ulogu je laser dobio samo zamenom klasičnog svetlosnog izvora [8,9].
- za igniciju pirotehničkih struktura [10]. Dimenzione zavisnosti pragova snage za igniciju, kao što je zavisnost praga energetske gustine u odnosu na dijametar snopa i površinu uzorka su manje zastupljene u literaturi. To je rađeno za lasersku igniciju eksplozija (kod teških metalnih azida) i kod PTN eksplozija. Ovi procesi su vezani sa zakonima disperzije svetlosti u zapremini transparentnih eksplozivnih prahova, ili sa fundamentalnim karakteristikama eksplozija (kritički dijametar detonacije). Bez obzira na mnogobrojnu literaturu, ipak se oseća nedostatak dimenzionalnih zavisnosti laserske inicijalizacije pirotehničkog sastava.
- za detonaciju mina, vojnih eksploziva, industrijskih eksplozivnih procesa.
- za mnogo mirnodopskih slučajeva, gde treba da smanji opasnost od eksplozivnih procesa.
- za dijagnostiku dimenzionisanja prahova i čestica, jer im eksplozivnost zavisi i od dimenzija, a ne samo od hemijskog sastava ,
- u elektrotehnici za snimanje raznih brzih procesa putem različitih tehnika (holograija...), pri eksploziji otpornika, drugih komponenata i uređaja.
- posebno veliku ulogu ima u rudarstvu i u svrhe inicijacije i u svrhe “bezbednih delovanja“ uz optička vlakna i kao zamena mehaničkih procesa obrade.

Sve ovo traži modelovanje.

Eksplozivne smeše se nalaze u raznim agregatnim stanjima (prisustvo vazduha, kiseonika) kao: zapaljivi gasovi, pare zapaljivih tečnosti, zapaljiva prašina u vazduhu.

Zapaljivi mediji stvaraju eksplozivne smeše u određenim granicama vezanim za: zapreminske odnose (koncentracija u vazduhu), pritisak, za temperaturu smeše, temperaturu i energiju uzročnika paljenja.

Definisani parametri imaju granice, unutar kojih se izaziva inicijalno paljenje, a zatim dolazi do eksplozije. Najniža koncentracija zapaljivog gasa u vazduhu, ispod koje nije moguće paljenje smeše, donja granica eksplozivnosti (LEL) i najviša koncentracija, iznad koje nije moguće paljenje, gornja granica eksplozivnosti (UEL) su pored temperature samopaljenja i minimalne energije paljenja MIE među glavnim parametrima za eksplozije (Tab.1.). Mehanizam paljenja kod optičkog zračenja zavisi od talasne dužine zračenja, apsorpcije materijala, goriva, pritiska, sredina u kojoj se vrši zračenje, vremena zračenja. Ima mnogo kombinacija navedenih parametara, koji utiču na opasnost od optika u eksplozivnoj sredini. U literaturi se nalazi i mnogo drugih definisanih parametara, koji opisuju inicijaciju i uopšte eksplozivne procese. U Tab. 1 je dato poređenje minimalnih energija optičkih impulsa paljenja i relevantnih parametara.

U ovom radu će se prikazati rezultati modelovanja zagrevanja metalnog kontejnera u kome se nalazi definisana zamišljena eksplozivna smeša, koja je vezana za svoje karakteristične parametre.

Tab 1. Poređenje merenih minimalnih energija optičkih impulsa paljenja ($Q_{ep}^{i,min}$) od snopa prečnika $90\mu m$ sa temperaturom auto paljenja AIT (Auto Ignition Temperature) i minimalnom energijom paljenja MIE (Minimum Ignition Energy) iz literature [1] kod koncentracija (%) po zapremini (φ). Crni karbon je meta.

Gorivo	Q_{ep}^{min} [μJ]	φ [%]	AIT [$^{\circ} C$]	MIE [μJ]	φ^{MIE} [%]	$Q_{ep}^{min}/$ MIE
Trajanje impulsa 70 μs						
n-Pentan	669	3	260	280	3,3	2,4
	>55000	6,4				
Propan	784	5,5	470	240	5,2	3,3
Dietil etar	661	3,4	175	190	5,2	3,5
	1285	5,2				6,8
Etin	218	5,5	425	82	6,5	2,7
Vodonik	88	21	560	17	28	5,2
CS ₂	79	6.5	95	9	8,5	9,3
Nanosekundni impulsi (20ns - 200ns)						
Propan	499	4,0	470	240	5,2	2,1
Etin	179	5,5	425	82	6,5	2,2
Vodonik	44	12	560	17	28	2,6
	46	21				2,7

3. Primena lasera u rudarstvu

Pored mnogo dijagnostičkih primena, kojima se mogu meriti dimenzije čestica, i određivati male koncentracije materijala, u tragovima postoji niz operacija kojima se putem bušenja i sečenja stena, može naći mesto lasera u rudarstvu.

Bušenje tvrdih stena i minerala korišćenjem standardnih metoda često predstavlja, tehnički (zbog velike tvrdoće) ili ekonomski (zbog visoke cene dijamantskih alata) ozbiljan problem. Prilikom primene laserskog snopa, problem tvrdoće radnog materijala se, uslovno rečeno ne postavlja. Ceni se da bušenje tla primenom laserskih snopova, u cilju otkrivanja gasa ili sirove nafte, napreduje 10, pa i do 100 puta brže u odnosu na klasično bušenje dijamantskim krunama ili sličnim alatima. Svetlosna energija iz lasera sa površine prenosi se u šotinu kroz optički fiber i seriju sočiva. I tako fiberi postaju sve prisutniji za potrebe rudarstva.

“Lakoća“ laserskog bušenja se odnosi i na bušenje betona, asfalta, azbesta i drugih materijala. Ova primena laserskih tehnologija se vezuje i za građevinarstvo (za bušenje, tj. izradu tunela, puteva, vodovoda u gradskim sredinama, uključujući i postavljanje pravca).

Za rudarske ili građevinske radove često se vezuju eksplozivni procesi, tačnije potreba za miniranjem tla. Lasersko aktiviranje eksploziva je bezkontaktna metoda, ne zahteva preveliku blizinu ljudstva u trenutku aktiviranja eksploziva ni postavljanje dugačkih kablova (po nekoliko stotina metara). Prenos energije laserskim snopom bez kontakata je najvažniji za svrhe bezbednosti, što otvara put ka većoj primeni laserske opreme i u ovoj oblasti, [11].

Za rudarstvo, u podzemnoj eksploataciji, važno je utvrđivanje (merenje) koncentracije čvrstih minerala u vazduhu, koji se udiše u jamama. Za rudnike uglja važno

je i utvrđivanje koncentracije ugljene prašine i njene smeše sa prašinom ostalih minerala u rudničkim prostorijama. Detektori prašine imaju važnu ulogu, jer se merenjem koncentracije pouzdano ocenjuje potencijalna eksplozivnost atmosfere u jamama. Prednost optičkih metoda merenja koncentracije prašine u uzorcima vazduha iz jama je u brzini postupka merenja: dok je "klasičnim" metodama uzorkovanja i merenja trebalo i dve nedelje za dobijanje rezultata, novim optičkim metodama i prenosivim uređajima, ciklus merenja se znatno smanjuje, pa se u toku jednog dana može obaviti i po nekoliko analiza. Ukoliko je izmerena količina iznad dozvoljene, u uređaj se može postaviti alarm, koji odmah daje odgovarajuće upozorenje o opasnosti.

Primenjena lasera može da se odnosi na postavljanje fibera, koji dobijaju sve veću ulogu i mnogo novih zadataka u oblasti ruda i naftnih sirovina. Bušenje i sečenje stena laserom ima istoriju, koja se meri desetinama godina. Razvoj vojne tehnologije ovde je doprineo i civilnim primenama. Na sl.1 je jedna tipična slika bušenja stena. (Proučavanja su počela još sa ratovima zvezda).

Mnogobrojni eksperimenti sa stenama tipa krečnjaka i peščara, i CO₂ laserom su rađeni paralelno u nekoliko laboratorija.



Sl.1 Tipična slika bušenja stena

U atmosferi, gde postoji opasnost od eksplozivnih procesa važno je koristiti neutralne komunikacione linije. Optička vlakna i ovde pokazuju svoju prednost u svrhe komunikacije i napajanja senzora druge prirode. Laseri na bazi optičkih vlakana - fiber laseri su dostigli dosta velike snage, tako da počinju da konkurišu drugim tipovima i u vezi sa mnogobrojnim zadacima eksplozivnih procesa.

Jedna od prednosti laserskih tehnika je što se za pojedine tipove ne zahteva posebno održavaju ekonomske cene. Brzine operacija su velike.

Specijalni aspekti u primenama sa bušenjem stena su odnosi sa prisutnošću fluida (isplaka) za bušenje "drilling muds" [11]. I lasersko profilisanje, "electronics blast" spada u interesantne teme od devedesetih godina prošlog veka.

4. Numerička simulacija

Nestacionarna analiza, termalni model košuljice granate

Primenom metoda konačnih elemenata izvršena je simulacija grejanja kontenera laserskim impulsom definisanih : vremena trajanja, talasne dužine i snage.

Termalna analiza prelaznih režima laserskih interakcija sa materijalima tipa metala počinje sa opisom temperaturnog polja sledećom jednačinom:

$$[B]\left\{\dot{u}\right\} + [K]\{u\} + \{R\}\{u + T_{abs}\}^4 = \{P\} + \{N\}. \quad (1)$$

Uzimajući u razmatranje toplotnu difuziju, jednačina se konvertuje u:

$$\{H\} + [K]\{u\} + \{R\}\{u + T_{abs}\}^4 = \{P\} + \{N\}. \quad (2)$$

U ovom radu neće biti uzeto u razmatranje računanje promene faze.

Koristi se sledeća notacija za obeležavanje matrica:

[B]=toplotni kapacitet matrice

[K]=toplotna provodnost matrice

[R]=radijaciona promena matrice

{P}=vektor primenjene toplote se puni, tako da bude u funkciji vremena, ali ne i u funkciji temperature

{N}=vektor nelinearne toplote zavisi od temperature

{H}=vektor entalpije

{H}={dH/dt}

{u}=vektor mreže tačaka temperature

{u}={du/dt}

T_{abs}=podešavanje skale apsolutne temperaturne skale zahteva promenu prenosa radijacione toplote ili granica sadržaja zračenja, kada su druge temperature i jedinice su specificirane u stepenima F ili °C.

Ravnoteža jednačina je rešena pomoću Newmark metoda sa promenljivim koracima vremena.

Bazirajući se na jednostepenoj integracionoj šemi, vreme izvoda čvorne temperature u (i+1) iteraciji sa korakom vremena (n+1), situacija je opisana kao:

$$\left\{u_{n+1}\right\}^{i+1} = \frac{1}{\theta\Delta t}\left\{u_{n+1}^{i+1} - u_n\right\} + \left(1 - \frac{1}{\theta}\right)\left\{u_n\right\}. \quad (3)$$

$$\left\{u_{n+1}\right\}^{i+1} = \left\{u_{n+1}\right\}^i + \left\{\Delta u_{n+1}\right\}^i \quad (4)$$

$$\frac{1}{\theta} = 2 - 2\eta$$

Za Newton-Raphson, iteraciona jednačina je:

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}[B_{n+1}]^i + [K_{T_{n+1}}]^i\right)\left\{\Delta u_{n+1}\right\}^i = \{R_{n+1}\}^i \quad (5)$$

Leva strana matrice mora biti aproksimirana kao:

$$\left(\frac{1}{\theta\Delta t}[B_{n+1}]^i + [K_{T_{n+1}}]^i\right) \approx \frac{1}{\theta\Delta t}[B_n] + [K_{T_n}], \quad (6)$$

gde je K_{Tn} tangencijalna krutost matrice razvijene u prethodnom koraku, tj.

$$[K_{T_n}] \approx [K_T] + 4[R_n]\{u_n + T_{abs}\}^3 - \left\{\frac{\partial N_n}{\partial u_n}\right\}. \quad (7)$$

Preostao vector je:

$$\{R_{n+1}\}^i = \{P_{n+1}\} + \{N_{n+1}\}^i - [K_{n+1}]^T \{u_{n+1}\}^i - [R_{n+1}]^T \{u_{n+1}^i + T_{abs}\}^4 + \left(\frac{1}{\theta} - 1\right) \left(\{P_n\} + \{N_n\} - [K_n] \{u_n\} - [R_n] \{u_n + T_{abs}\}^4 \right) - \frac{1}{\theta \Delta t (\{N_{n+1}\}^i - \{N_n\}^i)} \quad (8)$$

U prvoj iteraciji početni uslovi su:

$$\{u_{n+1}\}^0 = \{u_n\}, [K_{n+1}]^0 = [K_n], [R_{n+1}]^0 = [R_n], i[H_{n+1}]^0 = [H_n], \quad (9)$$

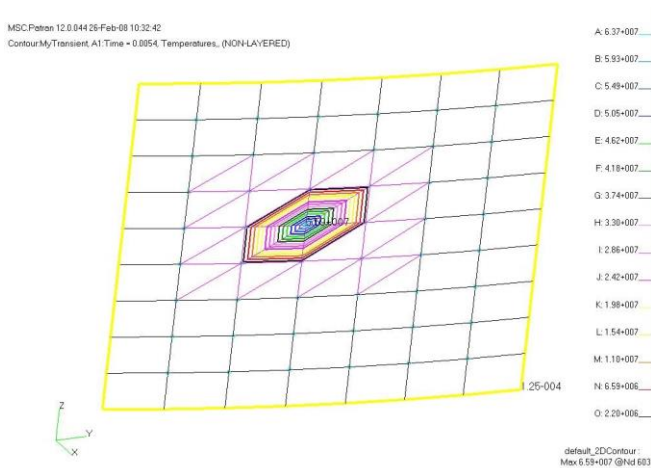
Prema tome, prvi član preostalog vektora može biti opisan kao:

$$\{R_{n+1}\}^0 = \{P_{n+1}\} + \{N_{n+1}\}^0 + \left(\frac{1}{\theta} - 1\right) \left(\{P_n\} + \{N_n\} \right) - \left(\frac{1}{\theta}\right) \left([K_n] \{u_n\} + [R_n] \{u_n + T_{abs}\}^4 \right) \quad (10)$$

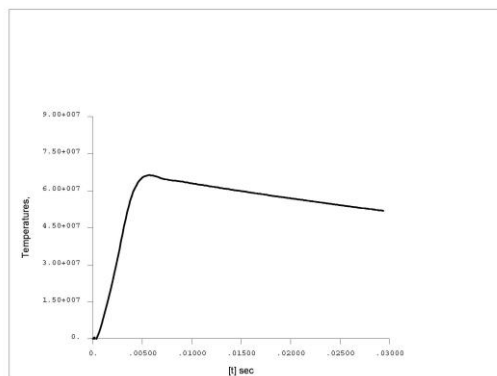
Područje od interesa je prikazano pomoću 24500 elementa sa četiri tačke četvorostране ravni koji rešava problem 24601 tačaka gde se upotrebljava temperature.

Rezultati analize primenom relevantnih jednačina termalnog modela su dati na sl. 2-4.

Vidi se da temperatura brzo opada, jer je uzeta u obzir i konvekcija površine košuljice (temperatura u ovom trenutku u zoni dejstva lasera je oko 800° C).



Sl.2. Temperatursko polje na kraju perioda 5 ms, dostiglo je skoro 900° C.

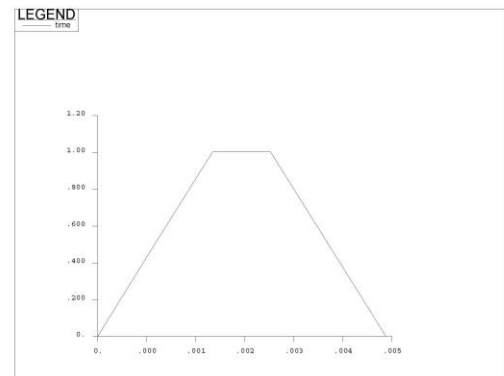


Sl.3. T(t) u dužem vremenskom intervalu.

Za predviđene profile laserskog snopa (sl.3.) temperatura brzo raste skoro do 750 °C, dok je laser aktivan, a zatim se polako hladi ka ambijentu.

Temperaturno polje je sadržano od t=0 do t=0,03s, kada je aktiviran laserski impuls u trajanju od 0,0048s.

Obuhvaćen je režim rada 5 ms od materijala idealnim izotropskim aluminijumom T-7075T6.



Sl.4. Profil laserskog snopa koeficijenta snage u funkciji vremena

5. Pitanja vizuelizacije procesa

U tehnologiji vizuelizacije dve dimenzije više nisu atraktivne, a ni povećanje dimenzija ekrana i monitora nije rešenje. Sve složeniji softver i komplikovanija istraživanja u svim oblastima nauke i tehnike počinju da zavise od trodimenzionalnog prikaza. Dosadašnja rešenja u ovoj oblasti donekle zadovoljavaju potrebe korisnika, ali se pre mogu smatrati prolaznom fazom, koja je u usponu. Prava se tek očekuju.

Jedna od interesantnijih budućih primena u formiranju 3D slike biće upotreba laserskog 3D projektora, koji je konstruisan u Japanu i zasniva se na fenomenu pojave emisije plazme u tačkama fokusiranja lasera prema koordinatama X, Y i Z. Objekti se u prostoru formiraju javljanjem usijanih tačaka plazme, koje emituju svetlost.

Već duže vreme se vrše istraživanja i eksperimenti radi pronalazjenja odgovarajuće tehnologije za prikaz 3D slika. Zajedničko svim ovim tehnologijama je što se ne formiraju realni svetlosni 3D objekti, već se samo stvara iluzija prostornosti uz fenomen binokularnog dispariteta. Tehnologija bazirana na ovom fenomenu se sreće kod 3D monitora, koji se već neko vreme serijski proizvode i prodaju. Sadašnji monitori su često naporni za dužu upotrebu i uglavnom se koriste u naučne svrhe za vizuelizaciju istraživačkih modela. Jedna od mana ovih monitora je usko vidno polje, što u praksi znači da se posmatrači moraju smestiti u tačno definisanu tačku u prostoru i samo mali broj gledalaca u isto vreme može da doživi 3D efekat. Kod laserskog 3D projektora takvih ograničenja nema, ali zato, s druge strane, on ima druga ograničenja, koja će verovatno vremenom biti prevaziđena.



Sl.5. Laserski 3D projektor

Laserski 3D projektor, se sastoji od impulsnog IC lasera sa repetitivom i galvanskih ogledala, kojima upravlja računar. Slika objekta, koju treba da formira projektor unosi se putem softvera u jednostavnom obliku, pošto uređaj, još uvek nije sposoban da formira složene prikaze u boji.

IC laser emituje po jedan snažan impuls svake 1/100 dela sekunde, dok računar upravlja kretanjem ogledala. 3D svetlosni model je sastavljen od malih „tačaka”, koje se generišu sa svakim impulsom iz lasera, što su zapravo mikroeksplozije azota i kiseonika u vazduhu na mestima, gde dolazi do fokusiranja laserskog snopa. Tokom procesa projekcije neprekidno se čuje „pucketanje”. Da bi uopšte došlo do formiranja slike, ove „tačke” moraju da se formiraju brzo, pa se koristi impulsi laser visoke repetitivnosti i računar, koji može dovoljnom brzinom da izračunava položaj sledeće mikroeksplozije. 3D slike se na ovaj način za sada mogu formirati na najvećoj udaljenosti od 2- 3m od uređaja, ali se očekuje da će u sledećim generacijama biti ostvarene veće udaljenosti, kao i projekcija u boji. Kreatori sa interneta predviđaju širok spektar upotrebe, a javljaju se i ponude za konkretnom primenu.

Za simulacije nekog procesa neophodna dobra vizuelizacija u cilju smanjenja od rizika eksplozije, koje se mogu javiti u različitim oblastima.

Posebna pažnja se poklanja SIS (Safety Instrument System) u cilju sprečavanja eksplozija u naftnoj i gasnoj industriji.

U cilju sprečavanja eksplozije može se koristiti ručni detektor mina, čiji se rad temelji na LIBS metodi (Laser Induction Breakdown Spectroscopy). LIBS metoda koristi impulsi laser, čiji se snop fokusira na željenu metu. Proizvodi se „oblačak” svetle plazme, koji se spektralno analizira u realnom vremenu što omogućuje prepoznavanje različitih elemenata upotrebom adekvatnog namenskog softvera.

U cilju simulacije razvijaju se specijalne vrste softverskih paketa u zavisnosti od primene uz korišćenje velike baze podataka sa odgovarajućim podacima i mogućnošću unošenja njihovih podataka od strane korisnika posebno dizajniranim korisničkim interfejsima.

Moguće je upotrebiti neke poznatije alate za kreiranje sopstvenih manjih simulacija: MATLAB, Flash, 3D Max, AutoCAD 3D, ProEngineer itd.

6. ZAKLJUČAK

U radu su razmotrene neke od mogućih primena lasera u vezi eksplozionih procesa. Analizirana su moguće tehnike

eksperimenta, koji podrazumeva su zagrevanje eksplozivne smeše (kontejnera) do kritičnih parametara. U ovom pristupu simulacije analiziran je slučaj sa aluminijumskim materijalom. Razvijena simulacija nije ograničena izborom prikazanih podataka i novi podaci sa izabranim tipom lasera se relativno lako mogu uključiti. U simulacione procese ove vrste po termalnom modelu uključene su savremene numeričke metode [15, 16]. Analizirane su izabrane i druge moguće veze lasera i eksplozionih procesa.

LITERATURA

- [1] IEC 60079-28 Ed. 1.0: Explosive atmospheres - Part 28: Protection of equipment and transmission systems using optical radiation
- [2] N. Marinović, Protueksplozijska zaštita električnih uređaja, Školška knjiga, Zagreb 1986.
- [3] N. Marinović, Električni uređaji i instalacije za eksplozivnu atmosferu, Zagreb, 1999.
- [4] R.M.Jovanov, , Protiveksploziona zaštita, Institut za nuklearne nauke Vinča, Centar za permanentno obrazovanje, Beograd, 2000.
- [5] R. J. Harrash, Estimates on the ignition of high explosives by laser pulses, Journ. Appli.Physics, Vol. 47, No. 6, 2473,1976
- [6] S. Lugomer, Eksplozija metalnog oblaka uzrokovana laserom: Analogija laboratorijskih i kozmičkih fenomena", Magazin Ruđer, Vol. 6, broj 7/8 , 2005
- [7] Mašković Lj., Radovanović R., Uroš I., Modeli minimizacije gustine oblaka eksplozivno-zapaljive smeše u zatvorenom prostoru, Zbornik radova *Međunarodnog naučno-stručnog savjetovanja "Kriminalistika u teoriji i praksi"*, str. 129-141, 2005.
- [8] M.Srećković, S.Ristić, Družijanić D., S.Milić, R.Gospavić, R.Radovanović, B.Đokić, Zbornik *JUKOCIGRE*, str.RD1-9(12), Cigra 2005
- [9] Kurzzeitphysik,Ed. K.Vollrath, G.Thomer, Mir, Moskva ,(prevod)
- [10] V.V. Medvedev, V.P.Tsipilev, A.N.Yakovlev, Dimensional effect at laser ignition of pyrotechic structure, Proc. *Int.Con.Radiation Physics, high current electronics, and modification of materials*, pp. 237-239
- [11] http://www.elorantaassoc.com/exp_in_mining.pdf
- [12] Srećković M., Radovanović R., Kajkut S., Polić-Radovanović S., Interferometric research methods in a ballistic experiment, NBP, Vol. VI-2, pp. 151 -177, 2001.
- [13] Viremski V., Laserska vojna tehnika, Vojna izd.delat., Beograd, 1986
- [14] R.Joeckle, B.Gautier, F.Lacroix, Ignition of Explosives by Laser Beam, *Lasers* 97, 1998, pp.435-591, 1998
- [15] Gospavić R., Popov V., Srećković M., C.S.Chen, DRM/MRD approach for modelling laser material interaction with axial symmetry , *Engineering Analysis with Boundary elements* , Vol.31, (3),pp. 200-207,2007
- [16] R.Gospavić,M.Srećković,V.Popov, G.Todorović, 3D Modelling of the Material Heating with the Laser-beam for the cylindrical geometry, *Mathematical and Computer Modeling*,Vol.43, ,pp. 620-631, 2006