

NÁVRH SOFTVÉROVÉHO NÁSTROJA UMOŽŇUJÚCEHO STANOVENIE ÚČINKOV EXPLÓZIE

THE DESIGN OF THE PROGRAM FOR THE BLAST EFFECT CALCULATION AND ASSESSMENT OF ITS IMPACT ON PEOPLE AND COMPOUNDS

Zuzana ZVAKOVÁ¹, Lucia FIGULI², Ladislav MARIŠ³

SUMMARY:

The paper is focused on the design of the program for the blast effect calculation and assessment of its impact on people and compounds. Program is based on the known mathematical models reflecting the maximum pressure of the explosion. The Detona software contains values of the building components resistance and the human body resistance too. The draft of the DETONA program is designed to simplify and accelerate calculations for assessment of the blast effect.

KEYWORDS: explosion, blast wave, assessment of the shock wave impact

ÚVOD

Výbušniny a nástražné výbušné systémy sú prostriedky páchania rôznorodých protizákonnej a protispoločenskej činnosti. Môžu byť prostriedkom na zastrašenie a šírenie paniky, je možné použiť ich na prekonanie systému ochrany objektu, najmä mechanických zábranných prostriedkov, poškodenie chráneného záujmu alebo jeho úplné zničenie a tiež môžu byť použité s cieľom zlikvidovať osoby alebo vážne poškodiť ich zdravie. Dnes sa dostáva do popredia viac ako kedykoľvek v minulosti potreba chrániť osoby a objekty pred účinkami explózie. Pozornosť je upriamovaná najmä na objekty osobitnej dôležitosti, objekty kritickej infraštruktúry a ostatné stavby a priestory, najmä tie v ktorých sa zdržiava väčšie množstvo osôb. Dôvodom sú možnosti použitia výbušnín, dostupnosť prostriedkov a postupov na výrobu niektorých druhov výbušnín spoločne s vývojom bezpečnostnej situácie.

Jednou z možností ochrany pred účinkami explózie je ich skúmanie vo vzťahu k referenčnému objektu a na základe zistení

návrh opatrenia, ktoré zvyšujú mieru ochrany objektu. Nami navrhovaný program predstavuje rýchlu a jednoduchú možnosť zistenia a hodnotenia tlakového účinku explózie na osoby a objekty v jej okolí.

1. TEORETICKÉ VÝCHODISKÁ PRE VYTVORENIE NÁVRHU SOFTVÉROVÉHO NÁSTROJA

Základom pre vytvorenie uvedeného softvérového nástroja, je poznanie vplyvu explózie na objekty v jej okolí a možnosti ich zisťovania. Najviac deštruktívny charakter má tlakový účinok explózie. Škody, ktoré spôsobuje tlak generovaný výbuchom sú rôzneho charakteru. Pre naše potreby sme ich rozdelili do dvoch skupín, škody spôsobené na ľudskom organizme a škody spôsobené na budovách.

Tlakový účinok explózie sa na ľudskom organizme prejavuje v podobe troch základných kategórií poranení. Vplyvom rázových vln vznikajú *primárne zranenia*, kedy dochádza k poškodeniu orgánov naplnených vzduchom. Zasiahnuté sú pľúca,

¹ Zuzana Zvaková, Ing., Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra bezpečnostného manažmentu, Ul.1.mája 32, 010 26, Žilina, tel.: +412 41 513 66 70, e-mail: zuzana.zvakova@fbi.uniza.sk.

² Lucia Figuli, Ing., PhD. Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra bezpečnostného manažmentu, Ul.1.mája 32, 010 26, Žilina, tel.: +412 41 513 66 15, e-mail: lucia.figuli@fbi.uniza.sk.

³ Ladislav Mariš, Ing. Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra bezpečnostného manažmentu, Ul.1.mája 32, 010 26, Žilina, tel.: +412 41 513 66 68, e-mail: ladislav.maris@fbi.uniza.sk.

gastrointestinálny trakt a stredné ucho, dochádza k pľúcnej barotraume, prasknutiu ušného bubienka, poškodeniu stredného ucha, krvácaniu v brušnej dutine a poškodeniu očí. Zasiahnutím organizmu črepinami od výbuchu vznikajú *sekundárne zranenia*, podobného charakteru ako strelné a tržné rany. *Terciárne zranenia* vznikajú v dôsledku odhodenia a pádu, resp. nárazu človeka do pevnej

prekážky. Sú to zlomeniny, amputácie, zatvorené a otvorené poškodenia mozgu [1]. Zranenia spôsobené rázovou vlnou nazývame „*blast syndrome*“. V tab. 1 uvádzame v intervaloch hodnoty tlaku a jeho pôsobenie na ľudský organizmus. Tieto hodnoty vychádzajú z doterajšieho výskumu v uvedenej oblasti a vychádzajú z [2, 3, 8, 9, 10].

Tabuľka 1

Pôsobenie tlakovej vlny na ľudský organizmus

Tlak (kPa)	Účinok na ľudský organizmus
<0÷1,3	Bez zranení.
<1,3÷10	Vznik zranení z črepinového účinku explózie.
<10÷16,5	Vznik ľahkých zranení od pôsobenia tlakovej vlny. Pád stojacich osôb a vznik zranení spôsobených pádom, poškodenie ušných bubienkov.
<16,5÷43,5	Vznik stredne ťažkých a ťažkých zranení od pôsobenia tlakovej vlny. Prasknutie ušných bubienkov a poškodenie pľúc.
<43,5÷100	Pravdepodobnosť úmrtia od priameho pôsobenia tlakovej vlny 1%
<100÷141	Pravdepodobnosť úmrtia od priameho pôsobenia tlakovej vlny 50%
<141÷ ∞	Pravdepodobnosť úmrtia od priameho pôsobenia tlakovej vlny 100%

V dôsledku explózie sa šíri pod povrchom terénu seizmická vlna, ktorej vlastnosti sú ovplyvnené obsahom podzemnej vody, obsahom vzduchu v póroch, stupňom stmelenia hornín a pod. [11] Seizmická vlna, tak ako aj tlaková vlna šíriaca sa vzduchom, spôsobuje poškodenia zasiahnutých objektov a v dôsledku jej pôsobenia môže dôjsť k zasypaniu osôb. Takéto zranenia nazývame „*crush syndrome*“.

Pre stanovenie rozsahu škôd spôsobeného vplyvom explózie na okolité objekty je

potrebné poznať reakciu jednotlivých stavebných konštrukcií a ich prvkov na zaťaženie tlakom od explózie. V súčasnosti je známych viacero zdrojov [2, 3, 7, 8, 9, 10] uvádzajúcich rozsah škôd, vzniknutých na stavebných prvkoch a konštrukciách, pri ich vystavení tak špecifickému zaťaženiu, ako je tlakový účinok explózie. Zo známych hodnôt sme zostrojili nasledujúcu tabuľku (tab. 2), kde v intervale uvádzame tlak a jemu zodpovedajúci rozsah poškodení.

Tabuľka 2

Pôsobenie tlakovej vlny na stavby

Max. tlak (kPa)	Popis rozsahu škôd
<0÷0,5	Na objektoch v okolí explózie nevznikajú žiadne škody . Dochádza k vzniku zvuku, ktorý označuje neobvyklú udalosť. Vzniká nepríjemný až hlasný hluk (do 143 dB).
<0,5÷5	Na objektoch vznikajú škody malého rozsahu . Charakteristické je poškodenie zasklenia rôznych stupňov až jeho rozbitie, rôzne stupne poškodení striech a tenkých priečok, deformácie a poškodenia rámov a závesov dverí a okien, vážne poškodenie až deštrukcia ľahkých priečok z poréznych materiálov a vznik menších škôd v štruktúre objektu.
<5÷10	Na objektoch vznikajú škody stredného rozsahu . Charakteristické je poškodenie ľahkých stavieb, vznik trhlín v murovaných priečkach, poškodenie obloženia v hlavných spojoch a vážne škody železobetónových stropných dosiek.

Max. tlak (kPa)	Popis rozsahu škôd
<10÷20	Na objektoch vznikajú značné škody . Charakteristické je zrútenie ľahkých drevených konštrukcií, vytrhnutie dverí zo zárubní a okien z rámov, čiastočné zrútenie múrov a striech budov, čiastočné poškodenie stavieb prízemnej zástavby rodinných domov, poškodenie betónových a škvarobetónových stenových nevystužených panelov a vznik trhlín v nosných prvkoch murovaných konštrukcií.
<20÷50	Na objektoch vznikajú veľké škody . Charakteristické je značné poškodenie mestských viacpodlažných stavieb, poškodenie vnútorných ľahkých priečok, pád drevených telefónnych stĺpov, narušenie oceľového rámu budovy a jeho oddelenie od základov, pád nenosných priečok, vážne poškodenia nosných prvkov murovaných konštrukcií a prepadnutie striech, poškodenie nevystužených tehlových stien a prevrátenie naložených vlakových vagónov.
<50÷90	Na objektoch vznikajú veľmi veľké škody . Charakteristické je pád menej odolných kamenných, tehlových a drevených stavieb a zrútenie časti nosných prvkov murovaných konštrukcií. Poškodenie elektrickej siete a poškodenie ľahkých železobetónových stavieb, poškodenie normálnych vonkajších tehlových stien a vážne poškodenie stien a zastrešení objektov zo železobetónu alebo oceľového skeletu a vážne trhliny v murive objektov s masívnymi tehlovými stenami.
<90÷150	Na objektoch vznikajú veľmi veľké až totálne škody . Charakteristické je poškodenie železobetónových stien, prerazenie steny z tvárnic, deštrukcia objektov s masívnymi tehlovými a železobetónovými stenami a úplné zničenie murovaných konštrukcií. Dochádza k úplnému zničeniu stavieb s výnimkou železobetónových stavieb špeciálnej konštrukcie, vznikajú trhliny v betóne a dochádza k pádu ťažkých drevených stavieb.
<150÷3052	Dochádza k totálnemu zničeniu objektu . Charakteristické je poškodenie železobetónových stavieb špeciálnej konštrukcie, poškodenie oceľových mostov, ťažké poškodenie až zrútenie masívnych železobetónových stavieb a prerazenie železobetónovej steny.

Pri výpočte pretlaku vznikajúceho pri explózii softvérový nástroj pracuje s matematickými vzťahmi Henrych [4] a Kavický-Figuli [6]. Vo výpočtoch sú zavedené známe redukované charakteristiky - redukovaná hmotnosť a redukovaná vzdialenosť.

Dôvodom pre zavedenie redukovaných charakteristík sú praktické skúsenosti s pôsobením výbušnín a javov vznikajúcich pri výbušných premenách.

Základom tohto tvrdenia je tzv. Zákon tretej odmocniny, v ktorom sa hovorí, že ak nastane detonácia dvoch náloží v rovnakej atmosfére, vyrobených z rovnakého materiálu, rovnakého tvaru ale inej hmotnosti, tento jav vyvolá veľmi podobné rázové vlny v rovnakých redukovaných vzdialenostiach [4].

2. STANOVENIE ÚČINKOV EXPLÓZIE NA OKOLIE – NÁVRH SOFTVÉROVÉHO NÁSTROJA DETONA

Navrhovaný program DETONA slúži na výpočet pretlaku vznikajúceho pri explózii trhaviny a stanovenie rozsahu dôsledkov explózie na osoby a objekty. Program pracuje so vstupmi uvedenými v prvej kapitole nášho príspevku (hodnoty odolnosti prvkov a matematické vzťahy). Používateľ má po spustení programu k dispozícii databázu dvanástich trhavín. Túto databázu môže používateľ ďalej upravovať podľa vlastných potrieb. Databázu je možné rozšíriť o ďalšie trhaviny alebo používateľ môže už uvedené trhaviny vymazať. V databáze (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**) sú uvedené charakteristiky trhavín potrebné pre výpočet veľkosti pretlaku - detonačný tlak a hustota trhaviny.

DETONA - Databáza

SPÄŤ ĎALŠÍ ULOŽ VYMAŽ PRIDAJ

HLADAJ O programe

ID	Názov trhaviny	Hustota trhaviny	Detonačná rýchlosť	Detonačný tlak
5	ANFO DAP-2	0,65	2,7	2,32
6	ANFO AL DAP-E	0,62	3,1	3,25
7	POLONIT	0,9	4,05	6,93
8	EMUNILIT 2 (POLAND)	1,26	5,46	0,89
9	DANUBIT GEOFEX	1,45	5	9,3
10	ČIERNY PRACH VESUVIT LC	0,9	0,34	0,69
11	NITROGUANIDINE	0,195	0,27	0,63
12	DYNAMEX M	1,4	5,5	11

ID Trhaviny: 7 (12)
 Název trhaviny: POLONIT
 Hustota trhaviny: 0,9 g/cm³
 Detonačná rýchlosť: 4,05 km/s
 Detonačný tlak: 6,93 GPa

VÝPOČET PRETLAKU

Obrázok 1. Databáza trhavín

Po výbere konkrétnej trhaviny, v nami prezentovanom prípade uvádzame priemyselnú trhavinu POLONIT, a zvolení možnosti „výpočet pretlaku“ je používateľ v novom okne vyzvaný, aby zadal ostatné charakteristiky potrebné pri výpočte pretlaku. Tieto charakteristiky sú:

- hmotnosť obalu nálože (kg),

- hmotnosť trhaviny, (kg),
- koeficient geometrie šírenia rázovej vlny k_G ,
 - pre detonáciu vo voľnom vzdušnom priestore $k_G = 0,5$;
 - pre detonáciu na povrchu (uvažujeme povrch zeme) $k_G = 1$,
- vzdialenosť od centra výbuchu, R (m).

DETONA - Výpočet

SPÄŤ

ID Trhaviny: 7
 Název trhaviny: POLONIT
 Hustota trhaviny: 0,9 g/cm³
 Detonačná rýchlosť: 4,05 km/s
 Detonačný tlak: 6,93 GPa

Hmotnosť obalu: 0,5 kg
 Hmotnosť trhaviny: 4,3 kg
 HMOTNOSŤ Σ: 4,8 kg
 Koeficient GEOM: 1,0 (0,5 - vzduch; 1,0 - zem)
 Vzdialenosť od centra explózie: 11,5 m

KOEFICIENT K_v KV: 0,65450
 RED HMOTNOSŤ W_r : 2,87980 kg
 KOEFICIENT K_E KE: 0,91667
 RED VZDIALENOSŤ Z : 8,08 m

PRETLAK P_+ : 22,92469 kPa

VPLYV NA BUDOVY
 VPLYV NA ZDRAVIE
 POMOC

Obrázok 2. Výpočet v programe DETONA

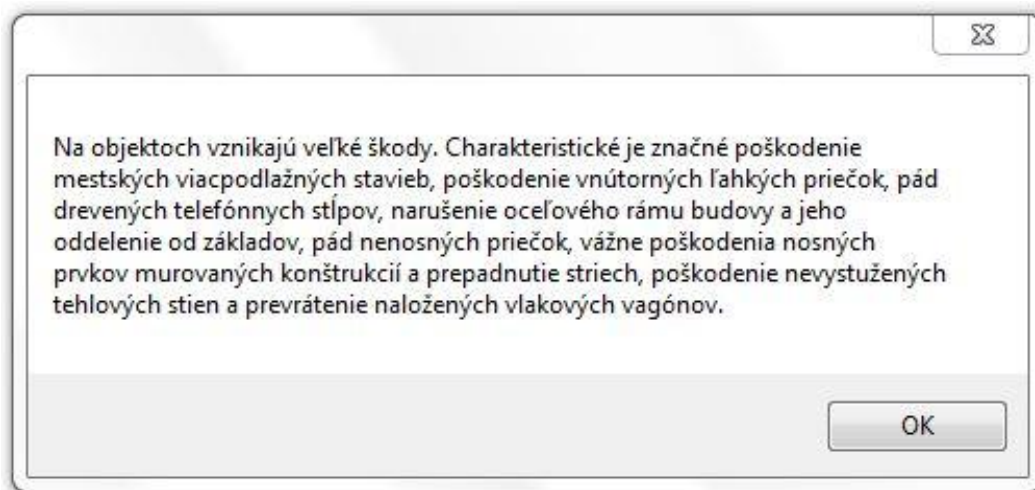
Následne, po uvedení všetkých charakteristík potrebných pre výpočet, užívateľ postupne zistí hodnoty ostatných charakteristík potrebných k výpočtu. Týmito charakteristikami sú *výbuchový koeficient* (k_v), *koeficient tesnoty nálože* (k_E), *redukovaná hmotnosť* (W_r) a *redukovaná vzdialenosť* (Z). Uvedené charakteristiky sú neoddeliteľnou súčasťou

výpočtovým modelov a ich cieľom je zjednodušenie výpočtu a zároveň obsiahnutie javov a skutočností ku ktorým dochádza pri explózii a šírení rázovej vlny.

Výsledná hodnota pretlaku vznikajúceho pri explózii, v nami prezentovanom prípade nálože trhaviny POLONIT s hmotnosťou 4,8 kg (0,5 kg obal + 4,3 kg trhavina), umiestnenej

na zemi a vo vzdialenosti 11,5 m od centra výbuchu, je 22,92469 kPa. Výberom možnosti „vplyv na budovy“ je táto hodnota priradená k intervalu a príslušnému poškodeniu objektu. V uvedenom prípade je hodnota priradená do intervalu $<20;50$ kPa, čomu prislúcha poškodenie veľkého rozsahu na budovách (**Chyba! Nenašiel sa žiaden zdroj odkazov.**). Charakteristické je značné poškodenie

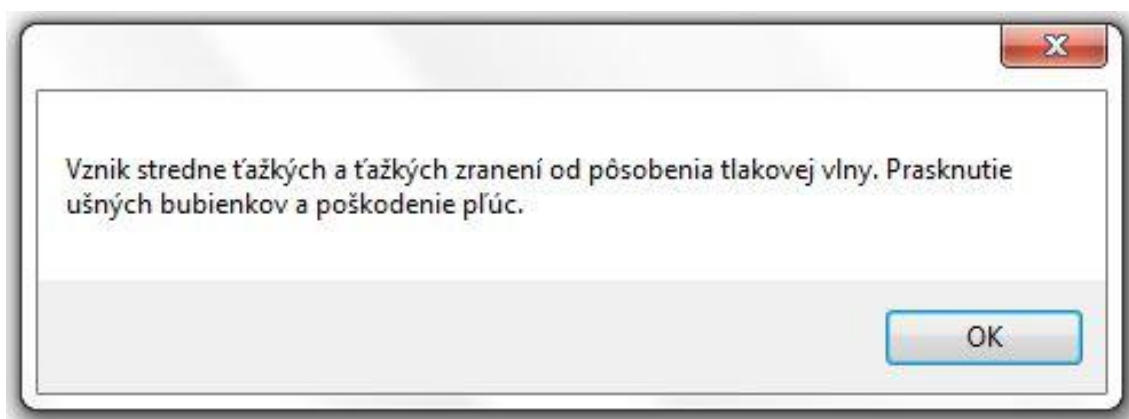
mestských viacpodlažných stavieb, poškodenie vnútorných ľahkých priečok, pád drevených telefónnych stĺpov, narušenie oceleového rámu budovy a jeho oddelenie od základov, pád nenosných priečok, vážne poškodenia nosných prvkov murovaných konštrukcií a prepadnutie striech, poškodenie nevystužených tehlových stien a prevrátenie naložených vlakových vagónov.



Obrázok 3. Popis poškodenia budov v prezentovanom výpočte

V prípade výberu možnosti „vplyv na zdravie“ je hodnota pretlaku priradená intervalu $<16,5;43,5$ kPa. Takémuto tlaku zodpovedá

vznik stredne ťažkých a ťažkých zranení od pôsobenia tlakovej vlny, prasknutiu ušných bubienkov a poškodeniu pľúc (obrázok 4).



Obrázok 4. Popis účinkov vypočítaného tlaku na ľudský organizmus

ZÁVER

Naším cieľom bolo vytvoriť návrh pre jednoduchý nástroj, s ktorým by bolo možné zistiť a vyhodnotiť vplyv tlakového účinku explózie na osoby a objekty. Vytvorením

programu sa zjednoduší a prehľadnejšie práca pri posudzovaní vplyvu výbuchu na okolie a určovaní dôsledkov spôsobených explóziou.

Výberom trhavy a zadáním relevantných charakteristík nálože (hmotnosť obalu

a hmotnosť trhaviny, vzdialenosť od objektu/osoby a pozícia vo vzťahu k zemi) program DETONA priradí z databázy charakteristiky potrebné pre výpočet. Použitím známych matematických vzťahov stanoví maximálny tlak pôsobiaci na objekty a osoby a priradí škody prislúchajúce intervalu, v ktorom sa vypočítaný tlak nachádza. Výsledkom je stanovisko, či dôjde k poškodeniu objektu alebo zraneniu osôb, a ak áno, tak v akom rozsahu, alebo či dôjde k usmrteniu osôb alebo úplnému zničeniu objektu.

V prvej časti príspevku sme uviedli teoretické východiská, ktoré sme pri tvorbe softvérového nástroja použili – matematické vzťahy potrebné pre výpočet maximálneho tlaku generovaného explóziou a hodnoty tlaku a im prislúchajúcim

rozsahom škôd na zdraví a objektoch. Druhú časť príspevku sme venovali samotnému návrhu softvérového nástroja DETONA, konkrétne postupu práce s ním a výsledkom, ktoré je možné jeho používaním zistiť.

DETONA je zatiaľ len návrhom nástroja, ktorého databázu trhavín a ich charakteristík budeme ďalej dopĺňať a rovnako bude program rozšírený aj o ďalšie funkcie. Náš návrh je už aj v súčasnej podobe využiteľný vo vedecko–výskumnej a pedagogickej činnosti.

Príspevok bol spracovaný v súlade s projektom:

IGP 201401 „Program na vyhodnotenie účinkov tlakovej vlny vznikajúcej pri explózii vybraných výbušnín na osoby a objekty.“

LITERATÚRA

- [1] CDC Injury Prevention. *Explosions and Blast Injuries* [on line]. [2014-11-07]. Dostupné na: www.cdc.gov/masstrauma/preparedness/primer.pdf.
- [2] DENKSTEIN, J. *Teorie rozpojování hornin výbuchem*. Pardubice : SPŠCHT, 1980.
- [3] DENKSTEIN, J. *Ochrana objektů před účinky havarijních výbuchů I. Vzdušné rázové vlny a vnitřní výbuch*. Pardubice : Vysoká škola chemicko-technologická, katedra teorie a technologie výbušnin, 1991.
- [4] HENRYCH, J. 1973. *Dynamika výbuchu a jeho užití*, Academia, Praha 1973.
- [5] JANGL, Š. – KAVICKÝ, V. Ochrana před účinkami výbuchov výbušnín a nástražných výbušných systémov. Žilina: Jana Kavická – KAVICKÝ, 2012. 294 s. ISBN: 978-80-971108-0-2.
- [6] KAVICKÝ, V. a kol. *Analysis of the field test results of ammonium nitrate: fuel oil explosives as improvised explosive device charges* In: Structures under shock and impact XIII : [13th international conference, SUSI 2014 : New Forest, United Kingdom, Boston: WITpress, 2014. - ISBN 978-1-84564-796-4. (WIT Transactions on the Built Environment, Vol. 141. - ISSN 1746-4498).
- [7] KOLOUŠEK, V. *Stavebné konštrukcie namáhané dynamickými účinkami*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1967. 1005 s. 63-121-67.
- [8] MAKOVÍČKA, D. *Navrhování stavební konstrukce při zatížení tlakovou vlnou od výbuchu*. ČVUT v Praze, Kloknerův ústav. Praha.
- [9] SKŘEHOT, P. *Prevence nehod a havárií*. Časopis výzkumu a aplikací v profesionální bezpečnosti [online], 2009, roč. 2, č. 4. ISSN 1803-3687.
- [10] NOVOTNÝ, M. *Bezpečnostní inženýrství I. Výbuchy hořlavých plynů a par*. Pardubice : VŠCHT Pardubice, 1988.
- [11] ŠTEFAN, J – HLADÍK, J. a kol. *Soudní lékařství a jeho moderní trendy*. Grada Publishing a.s., Praha. ISBN: 978-80-247-3594-8.