



VÝPOČET MAXIMÁLNEHO TLAKU VZNIKAJÚCEHO PRI EXPLÓZII ŠTANDARDNE A NEŠTANDARDNE ZHOTOVENÝCH VÝBUŠNÍN

Zuzana Zvaková¹⁾ Lucia Figuli²⁾ Ladislav Mariš³⁾

ABSTRAKT

Výbušniny sú nástrojom využívaným pri rôznych protispoločenských činoch, od vandalizmu cez organizovaný zločin až po teroristické útoky. S ohľadom na vývoj bezpečnostnej situácie vo svete, považujeme za potrebné zaoberať sa ochranou osôb a objektov pred účinkami explózie, najmä pred vplyvom tlaku generovaného výbuchom. Pri projektovaní systému ochrany objektu s potrebou ochrany aktív pred účinkami explózie, ale aj pri ostatných činnostiach spojených z ochranou pred účinkami explózie, je nutné poznať max. tlak, ktorý vzniká pri explózii a následky, ktoré môže na chránenom záujme spôsobiť. Na určenie max. tlaku a následkov explózie navrhujeme softvér, ktorý túto činnosť urýchli a zjednoduší. V článku uvádzame vybrané východiská, potrebné pre vytvorenie programu.

Kľúčové slová: explózia, tlaková vlna, hodnotenie účinkov tlakovej vlny.

ABSTRACT

Explosives are an instrument used in a variety of antisocial acts, from vandalism to organized crime and even to terrorist attacks. With the development of the security situation in the world, there is a need of necessity to address the security of persons and objects against the effects of explosions, particularly against the influence of the blast pressure.

In the design of the system of the object protection, with the need to protect assets against the effects of explosions, but also for other activities related to the blast protection, there is obvious to know the maximal blast pressure and its effects on the protected objects. To determine the maximal blast pressure and the effects of

¹ Zuzana Zvaková, Ing. Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra bezpečnostného manažmentu, Ul.1.mája 32, 010 26, Žilina, tel.: 041/513 6668, Zuzana.Zvakova@fbi.uniza.sk

² Lucia Figuli, Ing., PhD. Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra bezpečnostného manažmentu, Ul.1.mája 32, 010 26, Žilina, tel.: 041/513 6615, Lucia.Figuli@fbi.uniza.sk

³ Ladislav Mariš, Ing., PhD. Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Pracovisko výskumu bezpečnosti, Ul.1.mája 32, 010 26, Žilina, tel.: 041/513 6617, Ladislav.Maris@fbi.uniza.sk

explosions there is the design of software speeding up and simplifying the process, described in the paper. In the paper there are selected assumptions necessary to create the program.

Key words: explosion, blast wave, assessment of the shock wave impact.

ÚVOD

Bombový útok je najčastejším typom teroristického útoku, preto je používanie výbušnín spájané práve s teroristickými útokmi. Sú však aj iné oblasti protispoločenského konania, kde môžu byť výbušniny využité. Tieto látky sú účinným prostriedkom aj v oblasti organizovaného zločinu a majetkovej kriminality.

Oblasť protivýbuchovej ochrany stavieb, výskum reakcií pasívnych prvkov ochrany objektu pri pôsobení tlakového zaťaženia a výskum možností zvyšovania odolnosti objektov pred tlakovým účinkom výbuchu sú aktuálne celosvetové problémy. Pred rizikami spojenými s použitím výbušnín, najmä neštandardne vyrobených náloží ANFO trhavín, je potrebné chrániť aj bežne dostupné miesta, najmä tie, kde sa dlhodobo zhromažďuje veľké množstvo ľudí. Takýmito objektmi sú športoviská, nákupné centrá či kultúrne inštitúcie a spoločenské podujatia (*Paríž 2015* – koncertná sála Bataclan, reštaurácie Le Carillon, Le Petit Cambodge, La Belle Rquipe, *Boston 2013* – Bostonský maratón).

Cieľom príspevku je uviesť niektoré teoretické východiská potrebné pre kvalitatívne a kvantitatívne vyjadrenie tlakového účinku explózie výbušniny a predstaviť softvér, ktorý okrem iného umožňuje rýchly výpočet maximálneho tlaku generovaného explóziou vybranej výbušniny.

1 ANALYTICKÉ PRÍSTUPY POUŽÍVANÉ NA STANOVENIE NÁSLEDKOV EXPLÓZIE VÝBUŠNÍN

Rozsah škôd, ktoré možno predpokladať pri explózii výbušniny je možné zistiť prostredníctvom výpočtu veľkosti najviac deštruktívneho z účinkov explózie – tlakového efektu, konkrétne maximálneho tlaku generovaného výbuchom. Javy, ktoré vznikajú pri explózii výbušnín, ich analytické vyjadrenia a skúmanie sú rozsiahlou oblasťou, ktorá bola popísaná v mnohých vedeckých prácach, najmä v Koloušek (1967), Henrych (1973), Denkstein (1980), Denkstein (1991), Oberuč (2002), Mills (1987), Brode (1955), Newmark (1961).

Na stanovenie rozsahu škôd ku, ktorým dochádza pri explózii výbušnín je nutné vybrať vhodný prístup - výpočtový model. Spôsob výpočtu je determinovaný požiadavkami používateľa. V praxi môžu vzniknúť situácie, kedy je potrebné poznať nasledujúce skutočnosti.

- Priebeh tlakovej vlny vznikajúcej pri explózii výbušniny, napr. v prípade ak je potrebné určiť vzdialenosť, v ktorej je hodnota tlaku vo vzťahu k chránenému záujmu na akceptovateľnej úrovni – vytváranie bezpečnostných zón okolo referenčného objektu.
- Maximálny tlak generovaný explóziou konkrétnej výbušniny v konkrétnej vzdialenosti od miesta výbuchu.
- Reakcia stavebného objektu resp. prvku systému ochrany objektu na tlakové zaťaženie, napr. rozbitie okien, poškodenie vnútorných priečok, poškodenie nosných múrov, pád budovy a pod.
- Zistenie možnosti použitia výbušniny na prekonanie prvkov systému ochrany objektu resp. poškodenie alebo zničenie objektu - zistenie množstva výbušniny potrebnej na prekonanie vybraných pasívnych prvkov systému ochrany objektu.

Matematický vzťahy používané v tejto oblasti je možné vo všeobecnosti rozdeliť na tri základné skupiny. Prvá skupina je tvorená výpočtovými modelmi pre zistenie jednotlivých parametrov vzdušnej rázovej vlny, najmä max. tlaku. Druhou skupinou je výpočet množstva trhaviny potrebnej na zničenie konkrétneho prvku (mostu, budovy, steny). Tretia skupina je tvorená ostatnými matematickými vzťahmi, najmä tými, ktoré sú určené na stanovenie bezpečnostných vzdialeností skladov výbušnín a munície tak, aby bolo možné stanoviť množstvá uskladnenej výbušniny, napr. určenie bezpečnostných vzdialeností podľa vyhlášky MH SR č. 77/1996 Z. z o uskladňovaní výbušnín, metóda AASTP- 1 - NATO štandard a pod.

1.1 MAXIMÁLNY TLAK GENEROVANÝ EXPLÓZIOU VÝBUŠNINY

Zo všetkých účinkov výbuchu na okolie má tlakový účinok najviac deštruktívny charakter, preto sme sa zamerali na tento parameter.

Veľmi zjednodušene je možné povedať, že vzdušná rázová vlna prebieha vo dvoch fázach, pozitívnej a negatívnej. Počas pozitívnej fázy dochádza k vzniku a pôsobeniu pretlaku a v čase pôsobenia negatívnej fázy dochádza k nasávaniu vzduchu z okolia. Problematiku šírenia rázovej vlny podrobne popísali Henrych (1973), Koloušek (1967). Popis vlastností vzdušnej rázovej vlny, rovnako ako aj možnosti vyjadrenia javov, ku ktorým dochádza pri explózii výbušniny, najmä odraz tlakovej vlny, prechod tlakovej vlny prostrediami s rôznou akustickou impedanciou, ohyb a zatekanie tlakovej vlny, dynamický tlak a vyjadrenie jednotlivých parametrov vzdušnej rázovej vlny, podrobne popísali rôzni autori. Vyššie uvedené poznatky boli uvedené vo viacerých vedeckých prácach.

Vplyv tlaku generovaného explóziou výbušniny v otvorenom priestore na prekážku – referenčný objekt (osoby, stavebné objekty) závisí najmä od:

1. druhu výbušniny a typu nástražného výbušného systému,
2. umiestnení referenčného objektu vzhľadom na ohnisko výbuchu,
3. vlastností referenčného objektu,

4. ostatných skutočností ovplyvňujúcich účinkov tlaku, najmä vplyv prostredia ako podložie, reliéf okolia, vlastnosti ostatných stavebných objektov, okolitá teplota, rýchlosť a smer vetra a iné.

1.1.1 VÝPOČET MAXIMÁLNEHO TLAKU VZNIKAJÚCEHO PRI EXPLÓZII VÝBUŠNÍN

Pri výpočte maximálneho tlaku vznikajúceho pri explózii výbušnín sa používajú matematické vzťahy od rôznych autorov (M. A. Sadovskij, J. Henrych a ďalší). Princíp týchto matematických vzťahov je podobný. [5] Skúsenosti s javmi vznikajúcimi pri výbušných premenách boli dôvodom pre zavedenie redukovaných charakteristík – redukovanej hmotnosti a redukovanej vzdialenosti. Základom ich zavedenia je Hopkinsov zákon tretej odmocniny¹. [4]

Na základe štúdie J. Henrycha bola vytvorená nová sústava matematických vzťahov, ktorú označujeme ako Kavický – Figuli. Nový prístup je určených pre trhavinu typu ANFO, avšak zistili sme, že má uplatnenie aj pri ostatných trhavinách. [5] Výpočet maximálneho tlaku, ktorý vzniká pri výbuchu náložie trhavinu typu ANFO obsahuje tlakový koeficient založený na detonačnom tlaku a hustote výbušniny, pričom ostatné matematické modely pracujú s výbuchovým teplom trhavinu. [5] Tento koeficient ďalej vstupuje do výpočtu redukovanej hmotnosti výbušniny a redukovanej vzdialenosti, potrebnej pre výpočet maximálneho tlaku generovaného výbuchom.

Matematické vzťahy pre výpočet redukovaných charakteristík, tak ako aj tlakového ekvivalentu založenom na detonačnom tlaku a hustote výbušniny sú súčasťou navrhovaného programu. Maximálny tlak je počítaný na základe nižšie uvedených matematickým vzťahov. [5] Poznanie max. tlaku pôsobiaceho na objekty v blízkosti miesta explózie je kľúčové pre vyjadrenie predpokladaných následkov.

$$p_+ = \frac{0,61938}{Z} + \frac{0,03262}{Z^2} + \frac{0,2134}{Z^3}; \text{ pre } 0,3 < Z \leq 1, \quad (01)$$

$$p_+ = \left(\frac{0,202}{Z} + \frac{0,224}{Z^2} + \frac{1,182}{Z^3} \right) 0,5e^{0,03R}; \text{ pre } 1 \leq Z \leq 10, \quad (02)$$

$$p_+ = \left(\frac{0,202}{Z} + \frac{0,224}{Z^2} + \frac{1,182}{Z^3} \right) 0,5; \text{ pre } Z > 10, \quad (03)$$

kde p_+ je pretlak v čele rázovej vlny [MPa] a Z je redukovaná vzdialenosť.

¹ Ak nastane detonácia dvoch náloží v rovnakej atmosfére, vyrobených z rovnakého materiálu, rovnakého tvaru ale inej hmotnosti, tento jav vyvolá veľmi podobné tlakové vlny v rovnakých redukovaných vzdialenostiach. [4]

1.1.2 ODRAZ TLAKOVEJ VLNY

Pri dopade tlakovej vlny na pevnú prekážku vzniká odrazená vlna P_{kol} . Pretlak v odrazenej vlne zodpovedná dvojnásobku až osem násobku pretlaku v dopadajúcej vlne pre danú vzdialenosť od miesta výbuchu. [4, 6]

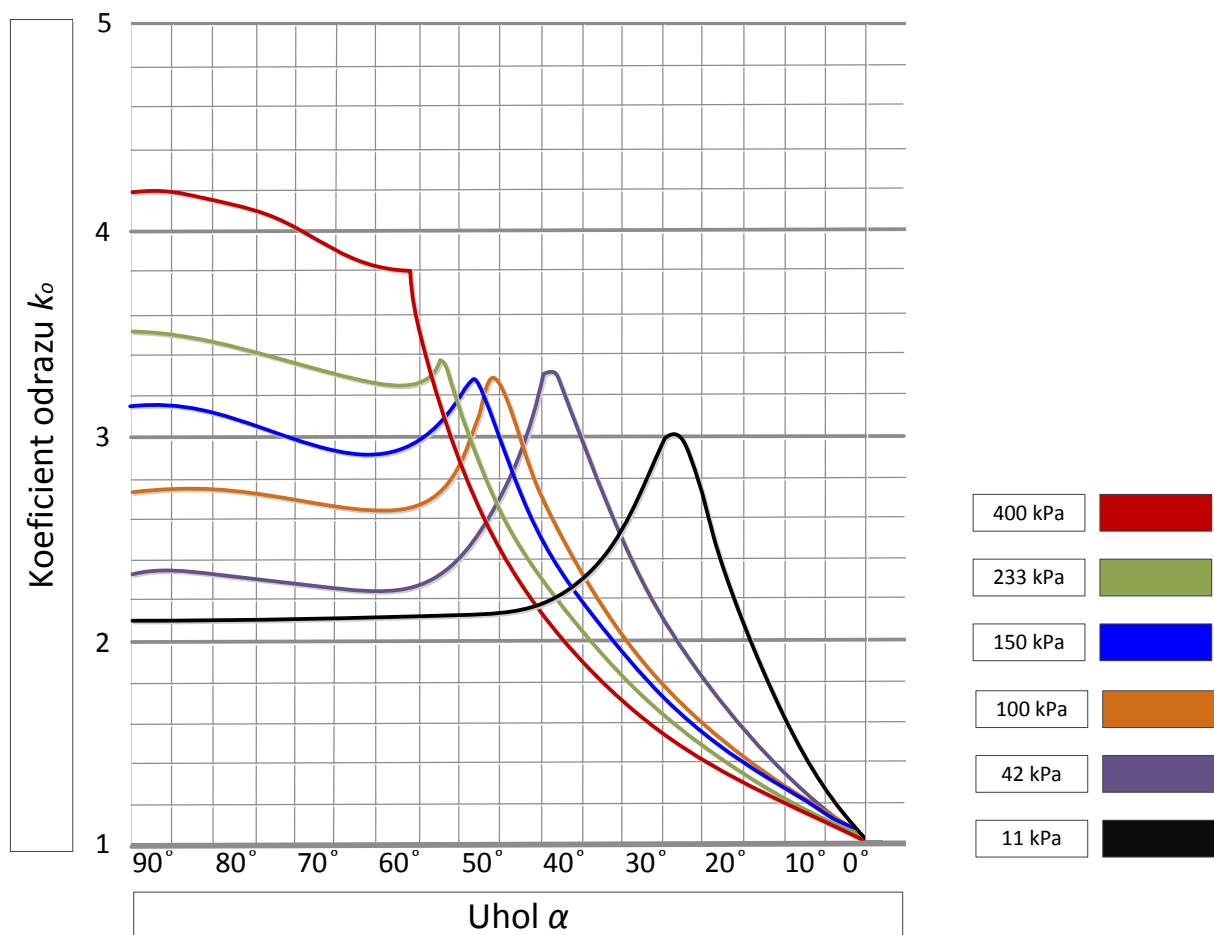
$$P_{kol} = 2p_+ + \frac{6p_+^2}{p_+ + 0,72}, \quad (04)$$

kde P_{kol} je pretlak v odrazenej vlne [MPa].

Pri šikmom dopade tlakovej vlny na pevnú prekážku pod uhlom α dochádza k jej odrazu. Koeficient odrazu k_{odr} sa stanoví na základe veľkosti pretlaku p_+ a uhlu α . Veľkosť tlaku v odrazenej rázovej vlne sa počíta nasledujúcim spôsobom [4, 6]:

$$P_{odr} = k_{odr} * p_+, \quad (05)$$

kde P_{odr} je veľkosť pretlaku v odrazenej vlne [MPa], k_{odr} je koeficient odrazu (obrázok 1) a p_+ je veľkosť tlaku v dopadajúcej vlne [MPa].



Obrázok 6 Koeficienty pre šikmý odraz tlakovej vlny. Vlastné spracovanie podľa [4]

1.2 VÝPOČET MNOŽSTVA VÝBUŠNINY POTREBNEJ NA PREKONANIE VYBRANÝCH PASÍVNYCH PRVKOV SYSTÉMU OCHRANY OBJEKTU

Súčasťou projektovania systému ochrany objektu, môže byť vo vybraných prípadoch obsiahnutá možnosť jeho prekonania pomocou výbušniny. V takomto prípade je možné vychádzať z max. hodnoty tlaku, ktorý vzniká pri explózii a odolnosti posudzovaného pasívneho prvku systému ochrany objektu alebo z vojenského predpisu Žen-2-6. Predpis Žen-2-6 (ďalej predpis) obsahuje základné ustanovenia o trhavinách a ničení.

Matematické vzťahy a postupy uvedené v predpise sú platné pre vojenskú trhavinu TNT. Z týchto postupov sme sa zamerali na tie, ktoré sú určené pre trhanie tehlového a kamenného muriva, betónu, železobetónu a predpätého betónu (ďalej trhanie muriva). Výber bol ovplyvnený najmä tým, že je potrebné poznať možnosť použitia výbušnín na prekonanie pasívnych prvkov plášťovej ochrany objektu, pričom na trhanie muriva predpokladáme použitie voľne priloženej nálože. Hmotnosť sústredenej nálože² na trhanie muriva je počítaná podľa matematického vzťahu [12] :

$$N = ABR^3, \quad (06)$$

kde N je hmotnosť nálože TNT [kg], A je koeficient pre trhanie horniny, muriva a železobetónu, B je koeficient tesnenia pre rôzne spôsoby uloženia nálože a R je polomer účinnosti [m].

Hodnoty koeficientov vychádzajú z predpisu a sú súčasťou navrhovaného programu. Na základe výsledkov je možné navrhnúť opatrenia na zvýšenie prielomovej resp. protivýbuchovej odolnosti prvkov systému ochrany objektu.

2 SOFTVÉROVÝ NÁSTROJ

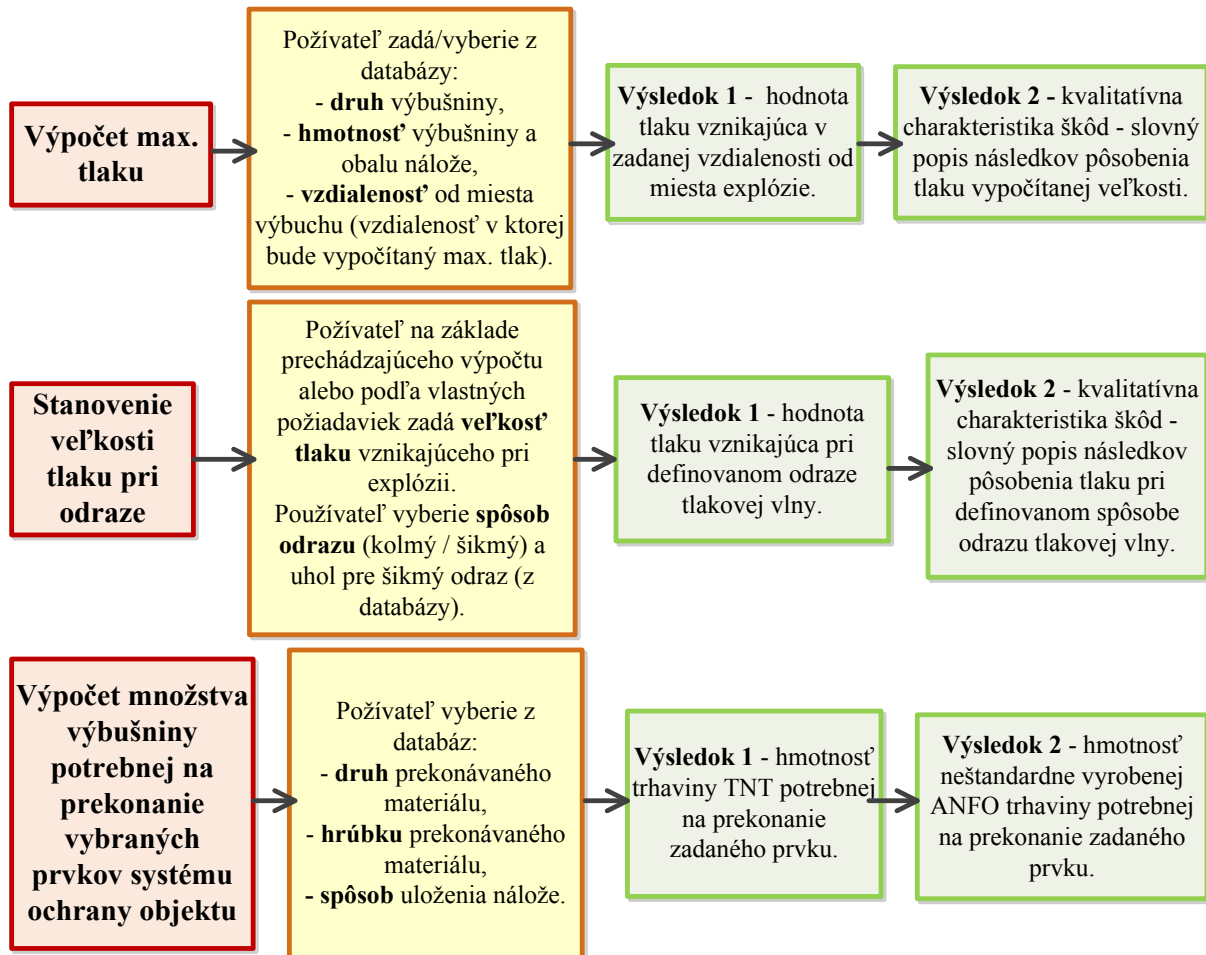
Aplikáciou vyššie uvedených matematických vzťahov a závislostí je softvérový nástroj, umožňujúci kvantitatívne a kvalitatívne vyjadrenie následkov explózie rôznych druhov výbušnín. Program obsahuje databázu dvanástich trhavín, ktorej súčasťou sú najmä vojenské a priemyselné trhaviny, ale aj neštandardne (podomácky) vyrobená ANFO trhavina. Používateľ môže túto databázu upravovať podľa vlastných potrieb. Okrem tejto, obsahuje program aj iné databázy, obsahujúce ostatné dáta potrebné pre výpočet.

Výnimočnosť programu spočíva v tom, že matematické vzťahy, ktoré sú v ňom použité, vypovedajú o skutočnej hodnote tlaku, generovanej pri explózii výbušnín.

² Sústredené nálože sa svojim tvarom čo najviac podobajú kocke alebo hranolu, ktorého najväčší rozmer (dĺžka) nie je viac ako trikrát väčší ako jeho ostatné rozmery (výška alebo šírka). Zostavujú sa z normálneho náloživa a sypkých trhavín.

Overovanie funkčnosti použitých matematických vzťahov, bolo súčasťou procesu tvorby programu.

Program má tri základné funkcie, ktoré sú uvedené na obrázku 2.



Obrázok 7 Základné funkcie programu

Nami vytvorený program môže byť použitý pri riešení mimoriadnych situácií spojených s rizikom explózie nástražného výbušného systému. Ďalej je program v praxi využiteľný pri projektovaní systémov ochrany objektov, zisťovaní potreby použitia prvkov ochrany objektu so zvýšenou odolnosťou pred účinkami explózie a pri určovaní následkov explózie v chránenom priestore (napr. pri plánovaní hromadných spoločenských udalostí, projektovaní/prevádzkovaní obchodných centier). Okrem úpravy už vybudovaných priestorov je program možné použiť aj v oblasti územného plánovania a urbanistického usporiadania. Nové priestory by mali byť navrhované s ohľadom na ochranu pred účinkami explózie výbušnín. Toto sa týka najmä priestorov ako sú centrá miest, obchodné centrá, športové areály, vládne budovy a kultúrne inštitúcie. Tento nástroj je využiteľný aj pre statikov, a to pri návrhu konštrukcií alebo posudzovaní existujúcich konštrukcií, a aj pre študentov študijného odboru Ochrana osôb a majetku a príbuzných odborov, zaoberajúcich sa v rámci svojho štúdia bezpečnosťou, výbušnami, výbušnými systémami, ochranou osôb a majetku a projektovaním bezpečnostných systémov.

ZÁVER

Pri tvorbe programu sme vychádzali z absencie poznatkov o odolnosti bežne používaných pasívnych prvkov systému ochrany objektov, pri ich zaťažení tlakovým účinkom výbuchu, rovnako ako aj z poznania, že matematické vzťahy a modely slúžiace na analytické vyjadrenie tlaku generovaného explóziou výbušniny sú orientované na vojenské trhaviny. Softvérové nástroje slúžiace na vyjadrenie následkov explózie sú založené na matematických vzťahoch, ktoré nevyjadrujú skutočný priebeh tlaku pri explózii.

Súčasťou nami navrhovaného softvéru sú matematické vzťahy, ktoré popisujú reálny priebeh tlakovej vlny pri explózii na voľnom priestranstve, čo je kľúčové pre následné vyjadrenie veľkosti tlaku pri odraze. Vzhľadom na dostupnosť prostriedkov na domácu výrobu ANFO trhavín, softvér obsahuje aj výpočet hmotnosti nálože takejto trhaviny, potrebnej na prekonanie vybraných pasívnych prvkov systému ochrany objektu. Toto umožňuje praktické uplatnenie pri projektovaní systémov ochrany objektov.

Softvér má svoje miesto pri návrhu a hodnotení systémov ochrany objektov a zisťovaní potreby jeho doplnenia o prvky odolné proti výbuchu, hodnotení úrovne ochrany ľudského života a zdravia pri rizikách spojených s bombovým útokom a pri posudzovaní účinkov explózie v priestore ohrozenom bombovým útokom.

LITERATÚRA

- [1] BRODE, H.L. *Blast Wave from a Spherical Charge*, The Physics of Fluids, No. 2. 1959
- [2] DENKSTEIN, J. 1980. *Teorie rozpojování hornin výbuchem*. Pardubice : SPŠCHT, 1980.
- [3] DENKSTEIN, J. 1991. *Ochrana objektů před účinky havarijních výbuchů I. Vzdušné rázové vlny a vnitřní výbuch*. Pardubice : Vysoká škola chemicko-technologická, katedra teorie a technologie výbušin, 1991.
- [4] HENRYCH, J. 1973. *Dynamika výbuchu a jeho užití*, Academia, Praha 1973.
- [5] KAVICKÝ, V. [et al.], 2014. *Analysis of the field test results of ammonium nitrate: fuel oil explosives as improvised explosive device charges*. In: Structures under shock and impact XIII ISBN 978-1-84564-796-4. ISSN 1746-4498).
- [6] KOLOUŠEK, V. 1967. *Stavebné konštrukcie namáhané dynamickými účinkami*. Bratislava: Slovenské vydavateľstvo technickej literatúry, 1967. 1005 s. 63-121-67
- [7] MAKVIČKA, D.- JANOVSÝ B. 2008. *Průručka protivýbuchové ochrany staveb*. Praha: Česká technika – nakladatelství ČVUT v Praze, 2008, ISBN 978 -80-01-04090-4
- [8] *Manual of Nato Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives - AASTP-1*. s.l. : NATO STANAG, 1996.
- [9] MILLS, C. A. 1987. *The design of concrete structure to resist exposures and weapon effects*. Edinburgh : s.n., 1987
- [10] NEWMARK, N.M. - HANSEN, R.J. 1961. *Design of blast resistant structures*. Harris and Crede McGraw-Hill. Shock and Vibration Handbook. New York. 1961.

- [11] OBERUČ, J. – CIGÁNIK, Ľ.: 2002. *Ochrana osôb a objektov pred nebezpečenstvom výbušných systémov*. In: ГУМАНІТАРНА ПАРАДИГМА РОЗВИТКУ ОСВІТНИХ ТА ЕКОНОМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СВІТЛІ КОНЦЕПЦІЇ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ БЕЗПЕКИ. МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ.. 2002.
- [12] ŽEN-2-6: *Trhaviny a ničenie*. Praha, 1982

Príspevok bol spracovaný v rámci projektu IGP201510.