

STANOVENIE TLAKU GENEROVANÉHO VÝBUCHOM RÔZNYCH DRUHOV VÝBUŠNÍN

DETERMINATION OF THE BLAST PRESSURE FROM THE EXPLOSION OF VARIOUS TYPES OF EXPLOSIVES

Zuzana ZVAKOVÁ¹, Lucia FIGULI² Ladislav MARIŠ³

SUMMARY:

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 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.

KEYWORDS: explosion, blast wave, determination of the blast pressure, assessment of the shock wave impact.

ÚVOD

Výbušniny a výbušné zmesi sú súčasťou života človeka približne od 10. storočia, kedy pribudli k zbraniam ako sekery, meče, obliehacie stroje a katapulty. Výbušniny sú teda v známe najmä ako prostriedok ničenia, nástroj využívaný vo vojnách a pri teroristických útokoch. Ďalšou, ľudmi často opomínanou oblasťou, je používanie výbušnín v priemysle, napr. pri ťažbe nerastných surovín alebo výstavbe a likvidácii stavebných objektov a prvkov infraštruktúry.

Jednotlivé prípady alebo oblasti využívania výbušnín spoločnosťou sa líšia sledovaným cieľom, avšak bez ohľadu na tieto ciele, vždy dochádza alebo môže dôjsť k negatívnym dopadom na kvalitu života, k vzniku škôd na živote a zdraví človeka, ako aj k vzniku škôd na stavebných objektoch a vzniku finančných strát. V prípade spoločensky prínosných aktivít hovoríme o vzniku takýchto škôd najmä pri priemyselných haváriách, v prípade činov namierených proti spoločnosti činov sú

to najmä škody vznikajúce v oblastiach po ozbrojených konfliktoch a škodách vznikajúcich pri rôznych formách organizovaného zločinu a pri teroristických útokoch.

Uvedené skutočnosti odôvodňujú váhu prikladanú oblastiam protivýbuchovej ochrany stavieb, výskumu reakcie pasívnych prvkov systému ochrany objektu na tlakové zaťaženie od výbuchu a výskumu možností znižovania zraniteľnosti objektov pred pôsobením tlakového účinku výbuchu, či už zvyšovaním ich pasívnej odolnosti alebo aplikovaním režimových opatrení v referenčných objektoch alebo ich okolí.

Uvedené oblasti tvoria aktuálne celosvetové problémy, zasahujúce do života takmer každého človeka. Na miestach prebiehajúcich ozbrojených konfliktov je možné hovoriť o potrebe ochrany obyvateľstva a aj armád. Mimo týchto oblastí hovoríme o ochrane civilného obyvateľstva, prvkov infraštruktúry a ochrane historických stavieb a pamiatok. Ku každej z uvedených oblastí je potrebné

¹ Zuzana Zvaková, Ing., PhD. Katedra bezpečnostného manažmentu, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Žilinská univerzita v Žiline, Májová 32, Žilina, tel.: +421 41 513 6668, e-mail: Zuzana.Zvakova@fbi.uniza.sk.

² Lucia Figuli, Ing., PhD. Katedra technických vied a informatiky, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Žilinská univerzita v Žiline, Májová 32, Žilina, tel.: +421 41 513 6615, e-mail: Lucia.Figuli@fbi.uniza.sk.

³ Ladislav Mariš, Ing., PhD. Pracovisko výskumu bezpečnosti, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Žilinská univerzita v Žiline, Májová 32, Žilina, tel.: +421 41 513 6617, e-mail: Ladislav.Maris@fbi.uniza.sk.

pristupovať s ohľadom na jej špecifiká. Spoločným znakom je potreba alebo až nutnosť poznať rozsah očakávaných škôd.

1. NÁSLEDKY EXPLÓZIE VÝBUŠNÍN

Následky explózie výbušnín je možné vyjadriť prostredníctvom tlaku vznikajúceho pri tomto jave. Veľkosť tlaku generovaného výbuchom je možné skúmať a vyjadrovať experimentálne alebo výpočtom.

Experimentálne skúmanie tlaku vznikajúceho pri explózii a jeho účinkov, môže prebiehať na otvorenom priestranstve alebo v rázovej trubici. Rázová trubica je laboratórne zariadenie slúžiace na vytvorenie riadenej rázovej vlny. Je nástrojom pre experimentálne skúmanie účinkov rázových vln na objekty. Pri takomto spôsobe testovania je skúšaná vzorka pripevnená na konci rázovej trubice a tlakový impulz – ráz v požadovanej veľkosti, je generovaný na jej začiatku. Výhodou takéhoto merania je rýchlosť, jednoduchá reprodukovateľnosť zaťaženia a jednoduchá príprava a aj samotné vykonanie a vyhodnotenie experimentu. Nevýhodou je obmedzenie veľkosti skúšanej vzorky, vzhľadom ku parametrom rázovej trubice, ťažké alebo až nemožné dosiahnutie parametrov ako pri reálnom výbuchu a komplikovaná tvorba videozáznamu.

Všeobecne platí, že testovanie v rázovej trubici je užitočné a relatívne lacné.

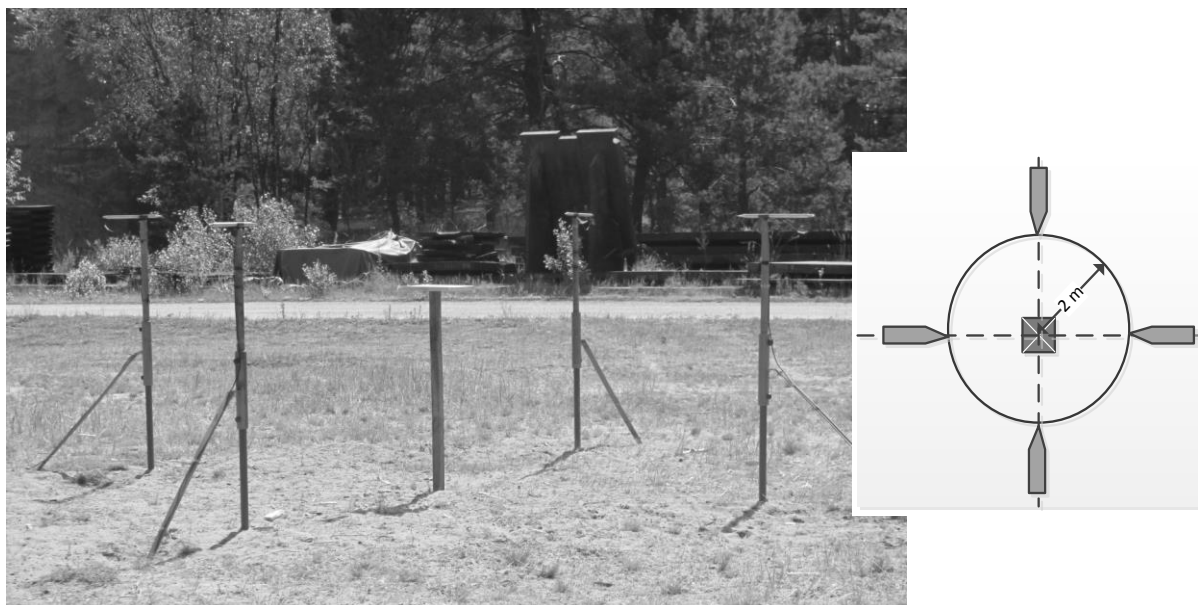
Experimentálne meranie na otvorenom priestranstve je skúškou v reálnych podmienkach. Výhodou takéhoto experimentu je, že:

- môžu byť použité hmotnosti náloží výbušnín, zodpovedajúce hmotnosti skutočným náložiam, používaných pri útokoch,
- môžu byť testované veľké skúšobné vzorky,
- počas skúšok je možné vytvoriť kvalitný videozáznam a fotodokumentáciu.

Nevýhody takéhoto merania sú:

- vysoké náklady testovania,
- náročná príprava,
- vysoké požiadavky na skúšobný priestor,
- možnosť vzniku odchýlok v dôsledku pôsobenia reálneho prostredia.

Experimentálne merania, ktoré sme vykonávali pri riešení problematiky tlaku, generovaného pri explózii rôznych druhov výbušnín, boli vykonávané v spolupráci s Vojenským technickým a skúšobným ústavom Záhorie (obrázok 1). VTSÚ Záhorie vlastní rázovú trubicu. Použitie rázovej trubice by však bolo v rozpore s našim cieľom, súčasťou ktorého bolo zameranie sa na reálny priebeh tlaku pri explózii.



Obrázok 1. Jedna z možností usporiadania snímačov tlaku generovaného výbuchom – experimentálne merania.

2. ANALYTICKÉ PRÍSTUPY POUŽÍVANÉ NA STANOVENIE NÁSLEDKOV EXPLÓZIE VÝBUŠNÍN

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 sa môžu vzniknúť situácie, kedy je potrebné poznať nasledujúce skutočnosti:

- Priebeh tlakovej vlny vznikajúcej pri explózii výbušniny, napr. v prípadoch, kedy 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 nálože v danej vzdialenosti od miesta výbuchu.
- Reakciu stavebného objektu resp. pasívneho prvku systému ochrany objektu na tlakové zaťaženie (rozsah škôd), napr. rozbitie okien, poškodenie vnútorných priečok, poškodenie nosných múrov, pád budovy a pod.
- Možnosť použitia výbušniny na prekonanie pasívneho prvkov systému ochrany objektu resp. poškodenie alebo zničenie objektu tzn. zistenie hmotnosti nálože výbušniny potrebnej na prekonanie vybraných pasívnych prvkov systému ochrany objektu.

Matematické vzťahy používané v tejto oblasti je možné vo všeobecnosti rozdeliť na tri základné skupiny.

Prvá skupina je tvorená výpočtovými modelmi zameranými na výpočet jednotlivých

parametrov rázovej vlny [2] [3] [4] [6] [7] [9]. Rozsah škôd, spôsobených explóziou výbušniny alebo nástražného výbušného systému je možné zistiť prostredníctvom výpočtu veľkosti najviac deštruktívneho z účinkov explózie - tlaku.

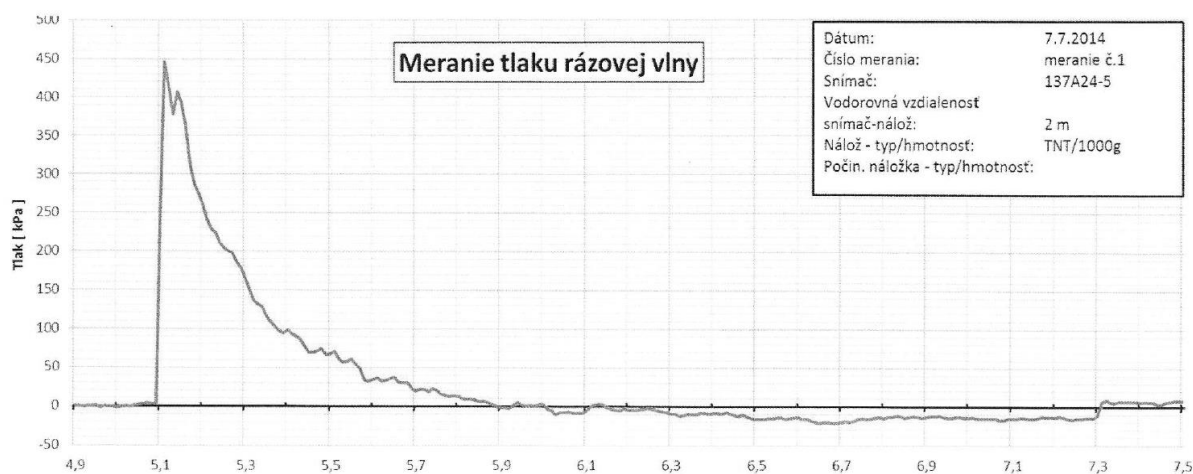
Druhou skupinou sú matematické vzťahy na výpočet množstva trhaviny potrebnej na prerazenie resp. zničenie konkrétneho stavebného prvku (mostu, budovy, steny). V tejto skupine matematických vzťahov ďalej rozlišujeme tie, ktoré sú používané v civilnom sektore a tie, ktoré sú používané v armáde.

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 alebo metóda podľa AASTP – 1 – NATO štandard [8] a pod.

V ďalšej časti sme pracovali s vybranými matematickým vzťahmi, ktoré možno zaradiť do prvej a druhej skupiny.

3. VÝPOČET MAXIMÁLNEHO TLAKU GENEROVANÉHO EXPLÓZIOU VÝBUŠNÍN

Veľmi zjednodušene je možné povedať, že rázová vlna vznikajúca pri explózii výbušniny prebieha vo dvoch fázach - pozitívnej a negatívnej (obrázok 2).



Obrázok 2. Skutočný priebeh tlaku pri explózii.

Počas priebehu pozitívnej fázy dochádza k vzniku a pôsobeniu pretlaku a v čase pôsobenia negatívnej fázy dochádza k nasávaniu vzduchu z okolia. Problematiku šírenia rázovej vlny, 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 [4] [6].

Vplyv tlaku generovaného explóziou výbušniny na otvorenom priestore na prekážku – referenčný objekt (osoby, stavebné objekty) závisí najmä od [1] [10] [11]:

- druhu výbušniny a typu nástražného výbušného systému,
- umiestnenia referenčného objektu vzhľadom na ohnisko výbuchu,
- vlastností referenčného objektu,
- ostatných skutočností ovplyvňujúcich účinkov tlaku, najmä vplyv prostredia ako podložie, reliéf okolia, vlastnosti ostatných stavebných objektov, okolitá teplota, rýchlosť a smer vetra a iné.

4. VÝPOČET MAXIMÁLNEHO TLAKU VZNIKAJÚCEHO PRI EXPLÓZII VÝBUŠNÍN

Pri výpočte max. 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] Všetky pracujú s redukovanými charakteristikami – redukovanou hmotnosťou a redukovanou vzdialenosťou. Základom ich zavedenia je Hopkinsov zákon tretej odmocniny. [4] Spoločným znakom uvedeným vzťahov je výpočet s pomocou výbuchového tepla pri vyjadrovaní redukovaných charakteristík.

Na základe realizovaných experimentálnych meraní a porovnaní výsledkov s používanými matematickými vzťahmi bol stanovený prístup J. Henrycha ako najvhodnejší na výpočet max. tlaku vznikajúceho pri explózii. Ďalej bola úpravou štúdie a matematických vzťahov J. Henrycha vytvorená a aj preverená nová sústava matematických vzťahov (1), (2), (3).

Nový prístup, vychádzajúci so štúdie J. Henrycha, je určený pre trhavinu typu ANFO

(zmes dusičnanu amónneho a paliva), avšak zistili sme, že má uplatnenie aj pri ostatných trhavinách. [5] V tejto sústave vzorcov do výpočtu redukovaných charakteristík vstupuje, okrem iného, tlakový koeficient založený na detonačnom tlaku a hustote výbušniny.

Maximálny tlak je počítaný na základe nižšie uvedených matematických vzťahov [5].

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

pre $0,3 < Z \leq 1$,

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

pre $1 \leq Z \leq 10$,

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

pre $Z > 10$,

kde: p_+ – pretlak v čele rázovej vlny [MPa]
 Z – redukovaná vzdialenosť.

Celá sústava matematických vzťahov je uvedená v [5].

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

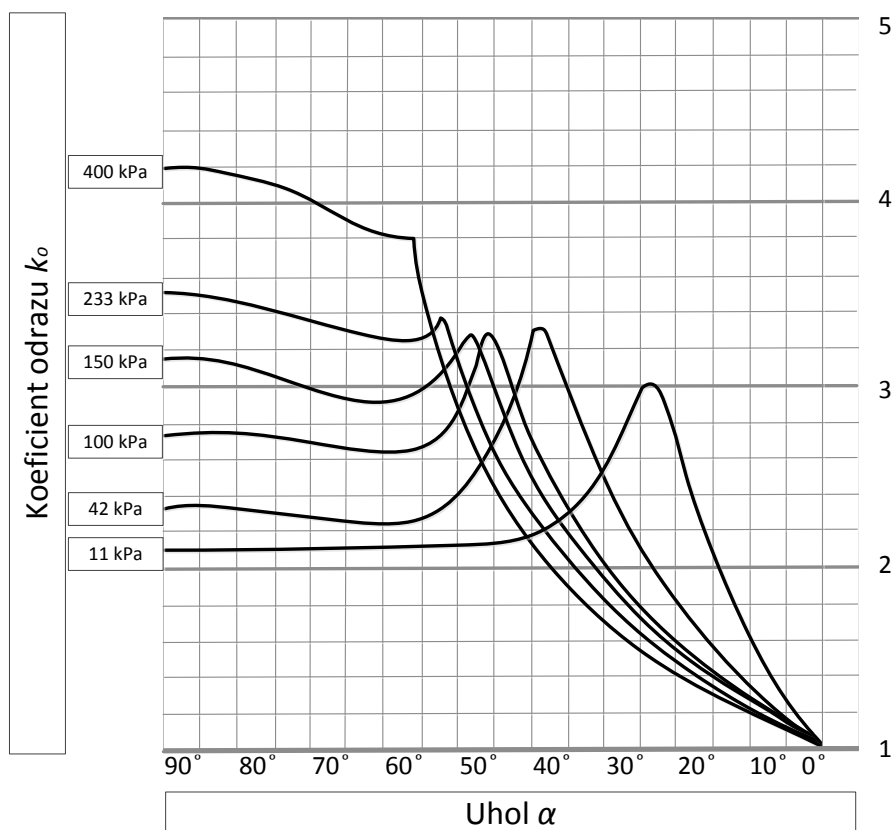
$$P_{kol} = 2p_+ + \frac{6p_+^2}{p_+ + 0,72} \quad (4)$$

Pri šikmom dopade tlakovej vlny na pevnú prekážku pod uhlom α dochádza k jej odrazu. Koeficient odrazu k_{odr} (obrázok 3) sa stanoví na základe veľkosti pretlaku p_+ a uhlu α .

Veľkosť tlaku v odrazenej rázovej vlne sa počíta nasledujúcim spôsobom [4] [6] :

$$P_{odr} = k_{odr} * p_+, \quad (5)$$

kde: P_{odr} – veľkosť pretlaku v odrazenej vlne [MPa],
 k_{odr} – koeficient odrazu
 p_+ – veľkosť tlaku v dopadajúcej vlne [MPa].



Zdroj: Vlastné spracovanie podľa [4]

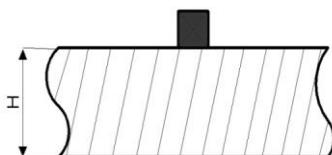
Obrázok 3. Stanovenie koeficientu pre šikmý odraz tlakovej vlny.

5. VÝPOČET HMOTNOSTI NÁLOŽE POTREBNEJ NA PREKONANIE VYBRANÝCH PASÍVNYCH PRVKOV SYSTÉMU OCHRANY OBJEKTU

Súčasťou projektovania systému ochrany objektu, môže byť aj posúdenie možnosti jeho prekonania pomocou výbušniny. V takomto prípade je možné vychádzať z hodnoty tlaku, ktorý vzniká pri explózii a odolnosti posudzovaného prvku systému ochrany objektu alebo z matematických vzťahov určených na výpočet hmotnosti nálož

potrebnej na likvidáciu konkrétneho prvku, napr. 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). Na trhanie muriva predpokladáme použitie voľne priloženej nálož podľa obrázku 4.



Zdroj: Vlastné spracovanie podľa [12]

Obrázok 4. Umiestnenie sústredenej⁴ priloženej nálož

⁴ Sústredené nálož 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.

Hmotnosť sústredenej voľne priloženej nálože je počítaná podľa matematického vzťahu [12] :

$$N = ABR^3, \quad (6)$$

kde: P_{odr} – veľkosť pretlaku v odrazenej vlně [MPa],
 N – hmotnosť nálože TNT [kg],
 A – koeficient pre trhanie horniny, muriva a železobetónu,
 B – koeficient tesnenia pre rôzne spôsoby uloženia nálože
 R – polomer účinnosti [m].

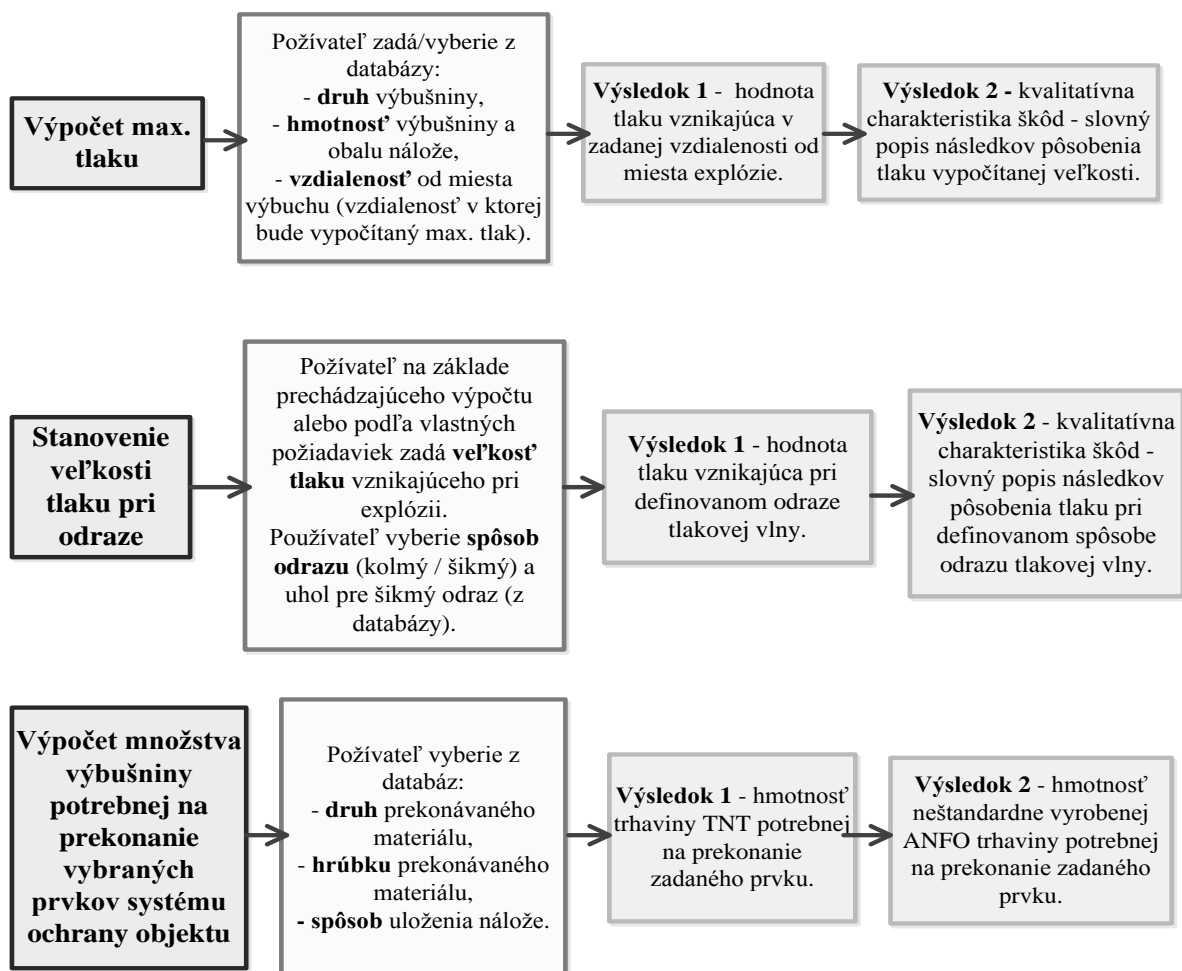
Hodnoty jednotlivých koeficientov vstupujúcich do výpočtu vychádzajú z uvedeného predpisu.

Na základe výsledkov je možné navrhnúť opatrenia na zvýšenie prielomovej resp. protivýbuchovej odolnosti prvkov systému ochrany objektu alebo vykonať hodnotenie zraniteľnosti objektu pri prekonaní systému ochrany pri použití výbušnín.

6. PROGRAM NA VÝPOČET A HODNOTENIE VPLYVU EXPLÓZIE NA OBJEKTY

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 túto databázu nemôže upravovať ale môže si vytvoriť novú databázu podľa vlastných potrieb. Okrem databázy výbušnín, obsahuje program aj databázy dát potrebných pre výpočet.

Program má tri základné funkcie, ktoré sú uvedené na obrázku 5.



Obrázok 5. Základné funkcie programu na výpočet a hodnotenie vplyvu explózie na objekty

Výnimočnosť programu spočíva v tom, že matematické vzťahy (1), (2), (3), ktoré sú v ňom použité, vypovedajú o skutočnej hodnote tlaku, generovanej pri explózii výbušnín.

Nami navrhovaný a vytvorený program môže byť použitý pri riešení situácií spojených s rizikom explózie výbušniny alebo nástražného výbušného systému. Program je tiež v praxi využiteľný pri projektovaní systémov ochrany objektov, zisťovaní potreby použitia prvkov systému ochrany objektu so zvýšenou odolnosťou pred účinkami explózie a pri určovaní následkov explózie v chránenom priestore (napr. pri plánovaní hromadných spoločenských udalostí, projektovaní a prevádzkovaní obchodných centier a pod).

Okrem úpravy už vybudovaných priestorov je program možné použiť aj v oblasti územného plánovania a urbanistického usporiadania. Nové priestory by v súčasnosti už 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.

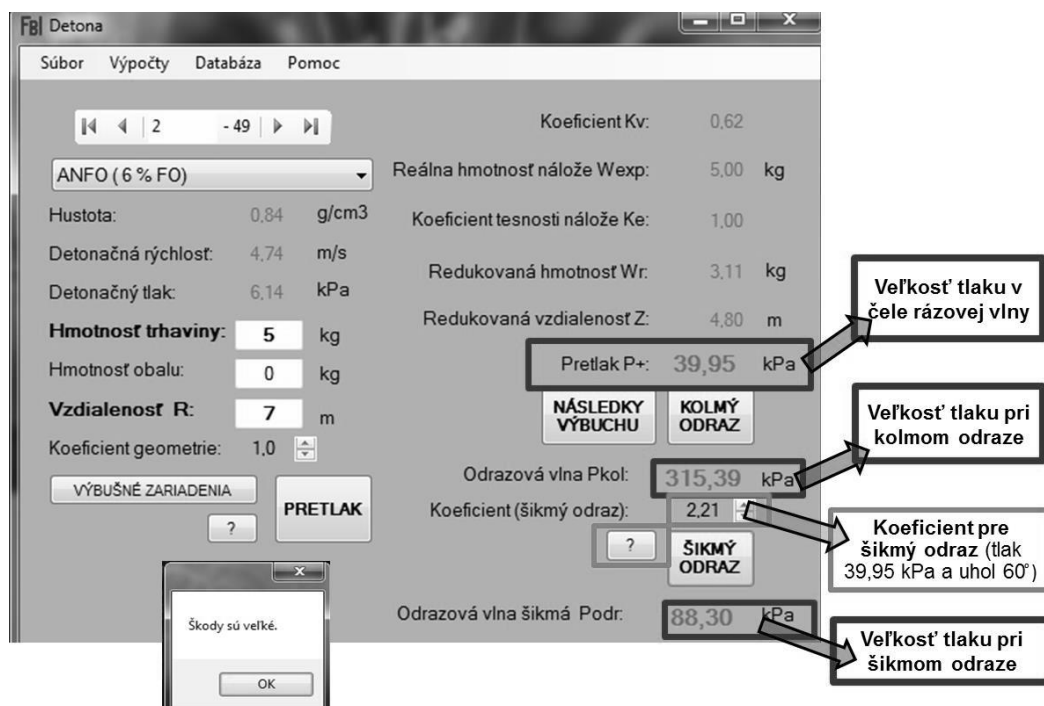
Tento nástroj je využiteľný aj pre statikov, a to pri návrhu konštrukcií alebo posudzovaní existujúcich konštrukcií.

Program je prínosom aj pre študentov študijného odboru Ochrana osôb a majetku a príbuzných študijných 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 a nevyjadrujú reálne zaťaženie vznikajúce pri výbuchu. Dnes používané softvérové nástroje používané v tejto oblasti sú založené na týchto matematických vzťahoch a teda 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 (obr. 6).



Obrázok 6. Ukážka navrhovaného programu na výpočet a hodnotenie vplyvu explózie na objekty

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 jeho 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 a hodnotení úrovne rizík spojených s explóziou výbušného nástražného systému a pri posudzovaní účinkov explózie v priestore ohrozenom bombovým útokom.

Príspevok bol spracovaný v rámci projektu IGP 201603.

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 výbušnin, 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] MAKOVÍČKA, D.- JANOVSKÝ B.: 2008. Příručka 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 explosions 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. – ČIGÁNIK, L.: 2002. Ochrana osôb a objektov pred nebezpečenstvom výbušných systémov. In: ГУМАНІТАРНА ПАРАДИГМА РОЗВИТКУ ОСВІТИХ ТА ЕКОНОМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У СВІТЛІ КОНЦЕПЦІЇ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ БЕЗПЕКИ. МАТЕРІАЛИ КОНФЕРЕНЦІЇ.. 2002.
- [12] ŽEN-2-6 Trhaviny a ničenie. Praha, 1982.