4.6.3 Účinky tlakové vlny

Tlaková vlna je rychle se šířící vlna zhuštěného vzduchu v atmosféře charakterizovaná postupnou změnou tlaku, hustoty a teploty na jejím čele. Obvykle je vytvořená a uvedená do pohybu explozí. Trajektorie šíření této vlny je ve směru od epicentra výbuchu a pohybuje-li se kontinuálním prostředím, pak její rychlost je ve všech směrech stejná (Encyklopedie BOZP, online).

TNT ekvivalent

Pro vyjádření reálných účinků tlakové vlny a pro jejich snadnější interpretaci se často používá takzvaný ekvivalent TNT. Jak už název sám napovídá, jedná se o množství TNT (trinitrotoluenu), které svým výbuchem vyvolá vzdušnou tlakovou vlnu stejných

parametrů jako zkoušená výbušnina, a která způsobí stejné destrukční účinky. Tento model lze použít pro oblaky plynu, par nebo oblaky prachu v mezích výbušnosti, či kondenzovanou (pevnou) výbušninu (pro posouzení účinků exploze nekondenzované fáze má význam pouze pro srovnání dosahu tlakové vlny) (Encyklopedie BOZP, online).

TNT ekvivalent lze zjistit z experimentálně zjištěných parametrů výbuchových vln, anebo jej lze vypočítat z hodnot výbuchových tepel podle rovnice 4-49.

$$W = \frac{\eta Q E_C}{E_{TNT}} \tag{4-49}$$

kde W je ekvivalent hmotnosti TNT (kg), Q je množství vybuchlého plynu (kg), E_C je spalné teplo plynu (kJ.kg^{-1}), η je účinnost výbuchu (stupeň konverze) a E_{TNT} je spalné teplo TNT (kJ.kg^{-1}).

Z ekvivalentu hmotnosti nálože TNT je možné odhadnout charakteristiky tlakové vlny podle maximálního přetlaku na jejím čele v jakékoli vzdálenosti od epicentra výbuchu a tedy i určit (odhadnout) odpovídající škody. Zkušenosti ale ukazují, že toto srovnání nelze použít mechanicky. Experimentálně naměřené hodnoty TNT ekvivalentu pro exploze oblaku par (VCE) jsou mnohem nižší, než byla jejich teoreticky předpovězená horní mez. U většiny explozí oblaku par při závažných haváriích tak ekvivalent TNT dosahuje pouze hodnot od 1 % do 10 % (v závislosti na spalném teple a celkovém množství uniklé hořlavé látky). Ukazuje se, že zřejmě jen relativně malá část celkové dosažitelné spalné energie se skutečně účastní na vzniku tlakové vlny. Ačkoli se v odborné literatuře připouští, že při průmyslových haváriích, při kterých došlo k explozi oblaku par, byly příležitostně pozorovány i mnohem vyšší škody, měření jednoznačně potvrdila, že většina explozí oblaku par hořlavých uhlovodíků v podobě tlakové vlny vyvinula energii pouze mezi 1 až 3 % spalné energie. Proto byl přijat obecný konsensus, že v případě události typu VCE se uvažuje o ekvivalentu TNT ve výši 3 % teoretické hodnoty (viz rovnice 4-49). Tento ekvivalent se zvyšuje pouze v případě reaktivnějších plynů (např. propylenoxid), a to na hodnotu 6 %, a pro vysoce reaktivní plyny (např. etylenoxid) na hodnotu 10 % (Sadhra a Rampal, 1999).

Použití modelu TNT ekvivalentu pro modelování exploze oblaku par (VCE) značně komplikuje také závislost hodnoty ekvivalentu TNT na vzdálenosti od epicentra výbuchu. Analýzou následků vybraných průmyslových havárií se totiž ukázalo, že charakteristiky tlakové vlny vzniklé výbuchem oblaku par (VCE) nejsou ve shodě s charakteristickými následky tlakové vlny vznikající po explozi konvenčních kondenzovaných výbušnin (např. trinitrotoluenu). Tento rozpor však není doposud numericky vyřešen, takže koncept ekvivalentu TNT se i u událostí typu VCE doporučuje i nadále využívat, avšak s použitím výše uvedených korekčních faktorů (Sadhra a Rampal, 1999).

Dosah tlakové vlny

Pro posouzení účinků exploze lze využít také parametr dosah tlakové vlny. Tento ukazatel slouží k vyjádření skutečnosti, do jaké vzdálenosti může dosáhnout tlaková vlna o příslušném přetlaku Δp na svém čele, čímž poskytuje cenné informace o distribuci „zraňující síly“ v okolí epicentra výbuchu (lze ji tedy vynést do mapových podkladů). Rovnice 4-50 vychází z empiricky zjištěných dat a má tvar:

$$\Delta p = (\frac{93{,}2}{Z} + \frac{383}{Z^2} + \frac{1275}{Z^3}), \tag{4-50}$$

přičemž

$$Z = \frac{R}{W^{1/3}} \tag{4-51}$$

kde Z je redukovaná vzdálenost (m), R je vzdálenost od epicentra výbuchu (m) a W je TNT ekvivalent (kg).

Při výpočtech účinku události typu BLEVE je nutno Δp odvozovat nikoli ze skladovacího nebo pracovní přetlaku uvnitř zařízení, ale od tlaku, při kterém se otevírají pojistné ventily. BLEVE je totiž značně složitý proces, který je způsoben zeslabením stěny nádoby zásobníku působením tepla emitovaného požárem kaluže pod zásobníkem nebo v jeho blízkém okolí. Experimenty ukázaly, že k roztržení pláště nádoby při rychlém nárůstu tlaku a teploty látky uvnitř zařízení dochází, jakmile dosáhne přibližně 1,21 násobku tlaku, na který jsou nastaveny pojistné ventily. Jestliže není pojistný ventil přítomen, uvažuje se při poruše za Δp hodnota tlaku odpovídající zkušebnímu tlaku zásobníku (Guidelines for Quantitative Risk Assessment: Purple Book, 1999).

Jelikož průběh tlaku v tlakové vlně může být značně komplikovaný (viz obrázek 63), je snaha její průběh a dosahy maximálních hodnot přetlaku na jejím čele modelovat. V případě tlakové vlny to však není s ohledem na složitost procesů vedoucích k jejich vzniku i šíření samotné vlny v reálném prostoru tak jednoduché. Praxe nás ale již mnohokráte poučila, že občas i velmi jednoduché koncepty mohou být nápomocné pro porozumění a modelování značně komplikovaných jevů. Ne jinak je tomu i v případě modelování dosahu maximálních hodnot tlakové vlny, pro které se nejnověji používá tzv. **akustický model** (van den Berg a kol., 2006). Jeho základní koncept spočívá v myšlence, že charakter šíření tlakové vlny vzniklé při explozi je stejný jako šíření vlny akustické, tj. zvuku. Tato analogie je postavena na jednoduchém matematickém vyjádření, které se vztahuje na akustickou vlnu přetlaku v určité vzdálenosti vzhledem k síle zdroje zvuku. Analogie akustického zdroje zvuku tak sestává z řešení vlnové rovnice a bere na sebe formu, která je závislá na rozměrových parametrech, charakteru explodující látky a koeficientech popisujících průběh výbuchu. Aplikace modelu tak vyžaduje dokonalou znalost síly zdroje tlakové vlny v podobě funkce

času. Síla analogického zdroje zvuku je zcela určena například únikem kapaliny z rozvíjející se trhliny v procesní nádobě (např. při jevu BLEVE). Zvětšování trhliny je komplexní záležitostí, která se může významně lišit v závislosti na struktuře a tvaru nádoby. Přetlak při vznikající ruptuře nádoby (např. se zkapalněným LPG) přenášející se do prostoru je úměrný časovému odvození síly zdroje, což znamená, že při kontinuálním úniku přehřáté kapaliny do otevřeného prostoru nedochází téměř vůbec ke zvýšení tlaku na rozdíl od úniku jednorázového. Nastane-li ale únik do uzavřeného prostoru, například v tunelu, dojde i při kontinuálním úniku k vyvolání rázového efektu. Všechny tyto skutečnosti byly v posledních letech důsledně zkoumány odborníky z holandské TNO, kteří vytvořili optimalizovaný akustický model určený jak pro exploze do otevřeného prostoru (viz rovnice 4-52) tak i pro ty, které nastávají v tunelech (viz rovnice 4-53).

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\gamma}{2\pi R v_0^2} \frac{2VF(\alpha - 1)}{(\Delta t)^2} \tag{4-52}$$

$$\frac{\Delta p}{p_0} = \frac{\gamma}{2A v_0} \frac{VF(\alpha - 1)}{\Delta t} \tag{4-53}$$

kde p_0 je okolní tlak (tj. atmosférický) (Pa), R je vzdálenost od epicentra výbuchu (m), F je frakce mžikového odparu (při jevu BLEVE je to přibližně 50 %), V je objem nádoby, kde dochází k jevu BLEVE (m^3), α je koeficient expanze tekutiny v páru (pro LPG dosahuje hodnoty okolo 260), Δt je doba úniku látky ze zařízení (s), γ je poměr specifických tepelných kapacit explodující látky a látky tvořící okolní prostředí, A je plocha profilu tunelu (m^2) a v_0 je rychlost zvuku v okolním prostředí (tj. vzduchu) (m.s^{-1}).

V tabulce 25 jsou uvedeny hodnoty maximálního přetlaku Δp při explozi typu BLEVE zásobníku s LPG o objemu 50 m^3 pro vzdálenost 10 metrů od zdroje. Z tabulky lze s ohledem na hodnotu přetlaku dobře odvozovat závažnost následků v závislosti na délce trvání jevu BLEVE (van den Berg a kol., 2006).

Tabulka 25: Hodnoty maximálního přetlaku Δp při explozi typu BLEVE zásobníku s LPG o objemu 50 m^3.

Doba úniku látky ze zařízení Δt (s)	**Přetlak Δp (kPa) ve vzdálenosti R = 10 m**
0,05	106
0,1	27
0,2	6,7
0,5	1,1
1	0,3

Tabulka 26: Maximální hodnoty přetlaku na čele vlny Δp (kPa) při explozi LPG v tunelu.

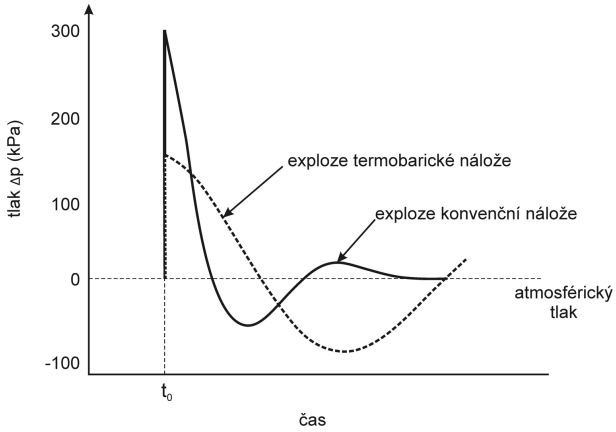
Doba úniku látky ze zařízení Δ*t* (s)	Maximální přetlak na čele vlny Δ*p* (kPa)
0,1	228
0,2	114
0,5	46
1	23
2	11

Za předpokladu exploze 50 m^3 LPG o teplotě 326 K při jeho úniku v tunelu o průřezu 60 m^2 dochází ke vzniku tlakové plny se širokým maximem (tzv. obdélníkový profil vlny). Maximální hodnoty přetlaku na čele vlny Δ*p* (kPa) podle akustického modelu shrnuje tabulka 26 (van den Berg a kol., 2006).

Účinky rázové vlny

Jeden z účinků exploze je náhlý vzestup tlaku vzduchu, který se od epicentra výbuchu pohybuje ve formě vlny. Tvar této vlny záleží na velikosti exploze a na vzdálenosti od epicentra. V případě detonace, kdy se tlaková vlna šíří rychleji než zvuk, je nárůst tlaku v podstatě okamžitý – hovoříme o rázové vlně. Charakter rázové vlny je takový, že se přetlak skokově zvýší až do své maximální hodnoty a pak poměrně rychle poklesne pod hodnotu tlaku atmosférického. Obvykle tento podtlak nehraje důležitou roli ve srovnání s hodnotou maximálního přetlaku, protože pokles tlaku po průchodu čela rázové vlny je relativně pozvolný (byť také velmi rychlý) a absolutní hodnota Δ*p* (oproti tlaku atmosférickému) nebývá větší jak –50 kPa. Při explozi průmyslového zásobníku s LPG o objemu 50 m^3, který nastal při jevu BLEVE, dosáhl ve vzdálenosti 10 metrů od epicentra (po 0,09 sekundy po výbuchu) podtlak hodnoty 20 kPa. Ovšem při velmi silných explozích, jako například při explozích jaderných zbraní, má tato tzv. záporná fáze za následek skokové obrácení směru větru, které může způsobovat vymrštění méně hmotných předmětů nebo i povalení a zranění osob (Sadhra a Rampal, 1999). Jelikož při této fázi dochází za určitých okolností k výrazným specifickým ztrátám (např. poškození plic, ušních orgánů apod.), účelově se konstruují tzv. termobarické zbraně[26], u nichž je tato fáze časově delší a vzniklý podtlak výraznější (v uzavřených prostorách až 70 kPa) (viz obrázek 63).

26 Jedná se o výbušniny, u nichž je spalná energie řádově menší, než energie výbušnin na bázi uhlovodíků. Výbušnou látku termobarických zbraní tvoří palivová explozivní hmota o hmotnosti od několika desítek kilogramů až po několik tun (u největších pum). Doplněk tvoří dvě oddělené konvenční nálože. První nálož v předem určené výšce nebo určeném okamžiku rozptýlí palivo do vzduchu. Vzniklý oblak smíšený se vzduchem se obvykle dostane do kontaktu s cílem, proti němuž je zbraň použita. S odstupem několika sekund následuje výbuch druhé nálože, který tuto směs zapálí. Následuje exploze, kterou doprovází velmi silná tlaková vlna. Ničivý účinek takové vlny a za ní následujícího podtlaku převyšuje účinnost běžných konvenčních výbušnin.



Obrázek 63: Profil rázové vlny po explozi (okamžik t_0) silné konveční výbušniny (plná křivka) a termobarické zbraně (přerušovaná křivka).

Když čelo rázové vlny narazí na terénní překážku, dojde k jejímu částečnému odrazu, čímž vzniká relativně malá odrazová vlna. Původní rázová vlna se šíří přes danou překážku dál, a tuto překážku buď strukturálně naruší, nebo „obteče“. V obou případech ovšem ztrácí část své energie. Při zvažování odrazu rázové vlny jsou rozlišovány dva limitní případy. Je-li směr vlny kolmý k povrchu překážky, je tlak působící na překážku maximální (a dochází k normálnímu odraznému zatížení), ale když je směr šíření vlny rovnoběžný s povrchem překážky (resp. s orientací jeho strany o největším rozměru), nenastane žádné výraznější zvýšení tlaku (dochází k postrannímu zatížení). Objekty vystavené jedním či druhým případem zatížení se však specificky deformují. Způsob, kterým se tyto deformace projeví, stejně tak i jejich hodnoty, záleží nejenom na zatížení, ale také na materiálních nebo konstrukčních vlastnostech překážky. Při zasažení rázovou vlnou mohou být některé konstrukce také rozvibrovány, přičemž frekvence vzniklého kmitání hraje z hlediska odolnosti staveb důležitou roli (Sadhra a Rampal, 1999). Jelikož je daná problematika velmi složitá a je spíše otázkou materiálně technickou a stavební, nebudeme se jí zde dále zabývat.

Charakter zranění lidí působením tlakové vlny

Obvykle se určují tři kategorie poranění lidí výbuchem, a to v závislosti na mechanismu, který poranění působí. První kategorie je primární poškození, způsobené přímými účinky tlakové a rázové vlny, kdy dochází k četným smrtelným zraněním vlivem krvácení do plic. Je-li vnější tlak na hrudník větší než vnitřní tlak v těle, hrudník se vmáčkne dovnitř, což vede k pohmožděninám vnitřních orgánů, případně i vnitřnímu krvácení. Nejčastějším bezprostředním zraněním vlivem účinku tlakové vlny je protržení ušního bubínku. Ušní bubínek je poškozen následkem přetlaku, protože charakteristická perioda vibrace orgánů ucha je malá v porovnání s dobou trvání tlakové vlny.

Druhou kategorií je sekundární poškození, způsobené rozletem fragmentů od epicentra výbuchu. Při určování účinků letících úlomků na lidské tělo se rozlišuje mezi úlomky, které způsobují řezné rány a úlomky, které řezné rány nezpůsobují. Zranění, která mohou vzniknout řeznými úlomky, jsou tržné rány a průstřely. Řezné úlomky jsou často lehké (o hmotnosti 10 gramů nebo i méně), a velmi často jsou tvořeny skleněnými střepy nebo jinými ostrými úlomky. Fragmenty, které nezpůsobují řezné rány, jsou většinou velké předměty, které však způsobují zasaženým lidem vnitřní poranění. Není možné teoreticky předpovědět pravděpodobnost ani závažnost poškození zdraví vlivem rozletu fragmentů (Sadhra a Rampal, 1999).

Lidé uvnitř hroutících se budov jsou vystaveni účinkům dopadu velmi těžkých částí konstrukce budovy. Ze snímků pořízených po zemětřesení či bombardování je vidět, že vertikální části konstrukce se obvykle zřítí a jednotlivá poschodí se navrství jedno na druhé (viz obrázek 15). Počet lidí, kteří přežijí tyto mimořádné události, je pravděpodobně dán náhodným vytvořením kleneb a prostor, vytvořených z trosek budovy, kde lidé mohou přežít. Tam, kde se použije model ekvivalentu TNT, je k dispozici vztah mezi pravděpodobným počtem přeživších osob a vypočítaným přetlakem. Tyto vztahy lze použít na budovy s běžnou stavební konstrukcí, jako jsou obytné domy nebo administrativní či obchodní budovy. Je však třeba pečlivě zvážit použití modelu TNT ekvivalentu na průmyslové budovy. Například ve Flixborough (1974) měla budova, kde se nacházel centrální velín, zpevněný betonový strop, který se však po explozi ve výrobně kaprolaktamu zřítil a nikdo z lidí uvnitř nepřežil (Sadhra a Rampal, 1999).

Třetí kategorií poranění lidí následkem výbuchu je kolize člověka s překážkou vlivem sražení či odhození člověka tlakovou vlnou. Může to nastávat jak během pozitivní fáze tak i negativní fáze rázové vlny. Nejvýraznější účinky terciárních následků nastávají tehdy, je-li člověk v okamžiku exploze ve vzpřímené poloze.

Probitová analýza následků

Pro odhad pravděpodobnosti úmrtí následkem tlakové vlny se používá například rovnice 4-54.

$$probit = -18{,}1 + 2{,}79 \ln(\Delta p) \tag{4-54}$$

kde Δp je stanovená hodnota přetlaku v čele tlakové vlny (kPa).

Experimentálně zjištěné následky výbuchů a příslušných hodnot přetlaku Δp v čele tlakové vlny pak prezentuje tabulka 27.

V analýzách a hodnocení rizik však obvykle nevyjadřujeme, do jaké vzdálenosti dosáhne příslušný přetlak Δp, nýbrž vzdálenosti, kde lze očekávat 1 %, 50 % a 95 % fatalitu. Takový výsledek tedy počítáme opačným postupem, tj. ze známých probit hodnot (tj. viz níže) spočítáme odpovídající přetlaky Δp a k nim posléze i příslušné

Tabulka 27: Vyjádření následků tlakové vlny podle přetlaku na jejím čele.

Přetlak v čele tlakové vlny Δp (kPa)	**Úroveň zničení budov a konstrukcí**
> 83	Úplné zničení
> 35	Vážné škody
> 17	Střední škody
> 3,5	Lehké škody
	Dopady na člověka
16,5	Poškození ušních bubínků 1%
19,3	Poškození ušních bubínků 10%
34,5	Poškození ušních bubínků 50%
43,5	Poškození plic
100	Úmrtí 1%
121	Úmrtí 10%
141	Úmrtí 50%
176	Úmrtí 90%
200	Úmrtí 100%

redukované vzdálenosti Z, resp. vzdálenosti od epicentra výbuchu R – dosahy dopadů na lidi vyjádřených zmíněnými fatalitami. Známe-li střední časový úsek, během kterého se mimořádná událost tohoto rozsahu může v daném místě reálně vyskytnout (např. v příslušné chemické továrně), můžeme vztažením těchto hodnot k časové jednotce jednoho roku získat hodnotu individuálního rizika, tj. rizika pro každého jednotlivce nacházejícího se v určitém místě v blízkosti zdroje tohoto rizika (blíže viz kapitola 5.2.7).