

Navrhování stavební konstrukce při zatížení tlakovou vlnu od výbuchu

Design of building structure loaded by explosion shock wave

Doc. Ing. Daniel Makovička, DrSc. ^{*/}, Ing. Daniel Makovička ^{**/}

^{*/} ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, 166 08 Praha 6, Šolínova 7,
e-mail: makovic@klok.cvut.cz

^{**/} Statika a dynamika konstrukcí, 284 00 Kutná Hora, Šultysova 170/8,
e-mail: d.makovicka@worldonline.cz

Klíčová slova: stavební konstrukce, účinky výbuchu, výpočet, posuzování
Key words: building structure, explosion effects, analysis, assessment

Abstrakt: Základní požadavky na navrhování stavebních konstrukcí, ohrožených výbuchem. Projevy výbuchu a jeho účinky. Principy hodnocení bezpečnosti a spolehlivosti konstrukcí na účinky výbuchového zatížení podle Evropských norem. Stanovení bezpečných odstupových vzdáleností. Příklad analýzy odezvy konstrukce. Stanovení charakteristik výbuchového zatížení od výbuchu pevné nálože. Zjednodušený výpočet časového průběhu zatěžující tlakové vlny a porovnání její intenzity podle různých autorů. Zjednodušené posouzení konstrukce. Aplikace na příkladu.

Abstract: The main requirements for building structure design threaten with a explosion. Explosion effects and their characteristics. Evaluation of safety and reliability principles of structure loaded by explosion effect by European Standard. Determination of safety distance. Example of structure response analysis. Explosion load characteristics of concentrated charge. Simplified determination of time histories of loading shock wave and their comparisons according to the some authors. Structure assessment. Example of application.

Úvod

Při výbuchu nálože v otevřeném prostoru je tlakové působení rázové vlny na překážku (zatížení stavební konstrukce) závislé na situování objektu vzhledem k ohnisku výbuchu, na parametrech zatíženého objektu, parametrech rázové vlny apod. Výbuch v otevřeném prostoru lze zjednodušeně použít i pro výbuch uvnitř konstrukcí. Celý jev působení rázové vlny na konstrukci je pak pro účely výpočtu zpravidla zjednodušován řadou předpokladů, které umožňují použití empirických vzorců. Takže i výpočty konstrukcí na účinky rázové vlny jsou těmito nepřesnostmi vstupních veličin celého jevu významně zatíženy.

Parametry výbuchu podle různých autorů

Struktura empirických vzorců podle různých autorů je velmi podobná, liší se zpravidla pouze velikostí součinitelů. S ohledem na variabilitu těchto součinitelů se nejistota vzorců pohybuje obvykle v rozmezí $\pm 20\%$. Spolehlivost

jednotlivých vzorců se zlepšuje s rostoucí vzdáleností takové vlny od ohniska výbuchu.

Při stanovení přetlaku na čele vzdušné rázové vlny, která se od výbuchu šíří do okolí, se vychází z redukované vzdálenosti [1, 3, 7, 10]:

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{C_w}} \quad (1)$$

kde \bar{R} je redukovaná odstupová vzdálenost od epicentra výbuchu [$\text{m/kg}^{1/3}$],
 R je vzdálenost od epicentra výbuchu [m],
 C_w je ekvivalentní hmotnost nálože [kg TNT].

Celkovou ekvivalentní hmotnost C_w určíme ze vztahu

$$C_w = C_N \cdot k_{TNT-p} \cdot k_E \cdot k_G \quad (2)$$

kde C_w je hmotnost ekvivalentní nálože [kg TNT],
 C_N je hmotnost použité nálože (reálné) trhaviny [kg],
 k_{TNT-p} je tlakový tritolový ekvivalent,
 k_E je koeficient těsnění nálože,
 k_G je koeficient geometrie šíření rázové vlny v prostoru.

Koeficient těsnění určíme ze vztahu

$$k_E = 0,2 + 0,8 / (1 + k_B) \quad (3)$$

kde k_B je hmotnost obalu [kg] / hmotnost trhaviny [kg] a vyjadřuje balistický poměr.

Pro koeficient geometrie šíření k_G platí, že:

pro detonaci ve volném vzdušném prostoru je $k_G = 1$;

pro detonaci na povrchu (terénu) je $k_G = 2$.

Výbuchová vlna od ohniska výbuchu se šíří v kulových vlnoplochách. Při pozemním výbuchu je energie výbuchu přibližně dvojnásobná, protože při úplném odrazu od povrchu terénu se tlaková vlna šíří v polokulových vlnoplochách (viz např. [2]).

Na základě zahraničních pramenů a našich zkušeností, vycházející z testování účinků výbuchu na okenní konstrukce a zděné stěny byly shromážděny empirické vzorce, vhodné pro použití jak pro pozemní, tak nadzemní výbuch ve volném (vzdušném) prostředí. Vzorce byly publikovány v [4, 5, 6] a jejich původní autory je v současnosti již problematické vysledovat.

A. Ruské prameny [3]

Ruské prameny zahrnují i americké výsledky. Pro pozemní výbuch ve výšce maximálně 20 m nad terénem mají empirické vzorce podobu:

$$p_+ = \frac{0,1}{R} + \frac{0,43}{R^2} + \frac{1,4}{R^3} \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

$$\tau_+ = 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[3]{C_w} \cdot \sqrt{R} \quad [\text{s}] \quad (5)$$

$$\tau_- = 0,016 \cdot \sqrt[3]{C_w} \quad [\text{s}] \quad (6)$$

$$p_- = \frac{0,03}{R} \quad [\text{MPa}] \quad (7)$$

kde \bar{R} je redukovaná odstupová vzdálenost od epicentra výbuchu [$\text{m/kg}^{1/3}$],

R je vzdálenost epicentra výbuchu od překážky [m],
 C_w je ekvivalentní hmotnost nálože [kg TNT],
 p_+ je přetlak na čele vlny [MPa],
 τ_+ je doba trvání přetlakové fáze [s],
 p_- je podtlak podtlakové fáze vlny [MPa],
 τ_- je doba trvání podtlakové fáze [s].

Pro nadzemní výbuch ve volném prostoru platí vzorce obdobné jako výše s upravenými koeficienty (dosazují se veličiny ve stejných rozměrech):

$$p_+ = \frac{0,084}{R} + \frac{0,27}{R^2} + \frac{0,7}{R^3} \quad [\text{MPa}] \quad (8)$$

$$\tau_+ = 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{C_w} \cdot \sqrt{R} \quad [\text{s}] \quad (9)$$

$$p_- = \frac{0,03}{R} \quad [\text{MPa}] \quad (10)$$

$$\tau_- = 0,016 \cdot \sqrt[3]{C_w} \quad [\text{s}] \quad (11)$$

kde označení veličin a jejich rozměry jsou stejné jako v předchozím případě. Jiní autoři uvádějí obdobné vzorce:

B. Sadovskij, M. A. [2]:

Vzorce jsou odvozeny pro výbuch ve vzduchu, pro pozemní výbuch se za hmotnost nálože C_w dosazuje dvojnásobek skutečné hmotnosti:

$$p_+ = \frac{1,07}{R^3} - 0,1 \quad [\text{MPa}] \quad \text{pro } \bar{R} \leq 1 \quad (12)$$

$$p_+ = \frac{0,076}{R} + \frac{0,255}{R^2} + \frac{0,650}{R^3} \quad [\text{MPa}] \quad \text{pro } 1 < \bar{R} \leq 15 \quad (13)$$

kde p_+ je přetlak na čele vzdušné rázové vlny [MPa],

\bar{R} je redukovaná odstupová vzdálenost od epicentra výbuchu [$\text{m/kg}^{1/3}$].

C. Henrych, J. [1]:

Pro pozemní výbuch se za hmotnost nálože C_w dosazuje dvojnásobek skutečné hmotnosti:

$$p_+ = \frac{1,40717}{R} + \frac{0,55397}{R^2} - \frac{0,03572}{R^3} + \frac{0,000625}{R^4} \quad [\text{MPa}] \quad \text{pro } 0,05 < \bar{R} \leq 0,3 \quad (14)$$

$$p_+ = \frac{0,61938}{R} + \frac{0,03262}{R^2} + \frac{0,2134}{R^3} \quad [\text{MPa}] \quad \text{pro } 0,3 < \bar{R} \leq 1 \quad (15)$$

$$p_+ = \frac{0,0662}{R} + \frac{0,405}{R^2} + \frac{0,3288}{R^3} \quad [\text{MPa}] \quad \text{pro } 1 < \bar{R} \leq 10 \quad (16)$$

D. Makovička, D. [4, 5, 7]:

Pro pozemní výbuch se za hmotnost nálože C_w dosazuje dvojnásobek skutečné hmotnosti. Níže uvedené empirické vzorce byly ověřovány experimenty při použití malých náloží (Semtexu) v blízkosti zatěžované konstrukce [4, 5]. Podkladem pro jejich ověřování byly empirické vzorce předchozích autorů;

jejich výsledná podoba pak odpovídá účinkům rázové vlny od malé pevné nálože ve venkovním prostředí při pozemním výbuchu. Maximální přetlak a podtlak v čele vzdušné rázové vlny a délka jejich trvání jsou:

$$p_+ = \frac{1,07}{\bar{R}^3} - 0,1 \quad [\text{MPa}] \quad \text{pro } \bar{R} \leq 1 \quad (17)$$

$$p_+ = \frac{0,0932}{\bar{R}} + \frac{0,383}{\bar{R}^2} + \frac{1,275}{\bar{R}^3} \quad [\text{MPa}] \quad \text{pro } 1 < \bar{R} \leq 15 \quad (18)$$

$$p_- = \frac{0,035}{\bar{R}} \quad [\text{MPa}] \quad (19)$$

$$\tau_+ = 1,6 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt[6]{C_w} \cdot \sqrt{R} \quad [\text{s}] \quad (20)$$

$$\tau_- = 1,6 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt[3]{C_w} \quad [\text{s}] \quad (21)$$

kde označení veličin a jejich rozměry jsou stejné jako v předchozích případech. Příklad výpočtu parametrů tlakové vlny programem [7] je uveden na obr. 1.

Výpočet porušení stěn budov nebo místností

Pro posuzování zdiva stěn a pilířů v budovách lze použít odhad zatížení $p_{\text{load+}}$ a délku jeho působení $t_{\text{load+}}$ vypočtených pro možnou vzdálenost R uložení nálože od posuzované části konstrukce. Pro stanovení nebezpečí porušení byl použit program [8] pro ekvivalentní statický výpočet stěny zatížené rovnoměrně spojitě zatížením $p_{\text{load+}}$ s délkou jeho působení $t_{\text{load+}}$. V rámci tohoto programu lze volit charakter okrajových podmínek (podepření stěnodesky).

Z hlediska nejistoty ve zjednodušení působení tlakové vlny od výbuchu, je i toto zjednodušení přijatelné a opodstatněné z hlediska inženýrského odhadu účinků výbuchu. Program [8] pro zjednodušený výpočet vychází z metodiky ekvivalentního statického výpočtu. Nejprve je tedy nutné stanovit naladění stavební konstrukce nebo její části. Pro zatížení tlakovou vlnou, která vytváří zjednodušeně spojitě rovnoměrné zatížení konstrukce, je zpravidla dominantním vlastním tvarem 1. vlastní tvar s kmitnou ve střední části stěnodeskové konstrukce (mísovitý průhyb) nebo nosníkové konstrukce. Použité vzorce pro výpočet vlastní frekvence stěnodeskové konstrukce jsou následující [2]:

$$\omega = \frac{\lambda^2}{l_x^2} \sqrt{\frac{D}{\mu}} \quad (22)$$

kde $D = \frac{1}{12} \frac{Eh^3}{(1-\nu^2)}$ je desková tuhost,

E je modul pružnosti,

ν je Poissonovo číslo,

h je tloušťka desky,

μ je hmota jednotkové plochy desky.

Dynamický součinitel δ je zpravidla odvozen pro ekvivalentní statický výpočet pro soustavu s jedním stupněm volnosti je funkcí vlastní periody dominantního kmitání konstrukce T a doby působení tlakové vlny t_+ nebo t_- podle toho zda

uvažujeme přetlakovou nebo podtlakovou fázi. Mezi vlastní periodou T a vlastní kruhovou frekvencí ω platí známý vztah

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (23)$$

Pro pružně plastickou soustavu je dynamický součinitel δ funkcí poměru doby působení rázové vlny t_+ nebo t na vlastní periodě kmitání konstrukce $T_{(i)} = T$ a na přetvárnosti (duktilitě) konstrukce:

$$k_m = \frac{y_m}{y_{el}} \quad (24)$$

kde y_m je celkový pružný + plastický průhyb (posunutí) konstrukce,
 y_{el} je pružná část průhybu (posunutí).

Obvykle lze součinitel duktility k_m pro rázové jevy (velmi rychlé) při ohybovém namáhání konstrukce uvažovat v rozmezí pro zdivo od 3 do 5, pro železobeton, ocel a dřevo od 5 do 10. Pro zatížení rázovou vlnou je velikost dynamického součinitele s uvažováním duktilního chování konstrukce v mezích $\delta = 1 \sim 2$. Jeho velikost odvodil N. M. Newmark (viz [2]) pro zjednodušenou soustavu s jedním stupněm volnosti ve tvaru:

$$\frac{1}{\delta} = \frac{T_{(i)} \cdot \sqrt{2 \cdot k_m - 1}}{\pi \cdot \tau_+} + \frac{1 - \frac{1}{2 \cdot k_m}}{1 + 0,7 \cdot \frac{T_{(i)}}{\tau_+}} \quad (25)$$

Kombinace statického a dynamického zatížení

Jestliže dojde k překročení meze únosnosti R_{tfd} , objeví se v materiálu konstrukce trhлина. Takže pro bezpečnou konstrukci musí platit nejnepříznivější podmínka, a to na základě porovnání napětového stavu:

$$\min(\sigma_g \pm \sigma_{expl}) \geq -R_{tfd} \quad \text{nebo po úpravě} \quad \sigma_{expl} - \sigma_g \leq R_{tfd} \quad (26)$$

kde σ_{expl} je napětí od účinků tlakové vlny výbuchu,

σ_g je normálové napětí v daném místě (spáře) od vlastní tíhy nadloží nebo podmínka přípustného mezního pootočení ψ . Jeho hodnota na mezi porušení je přibližně v rozmezí $2,3^\circ$ až $5,7^\circ$ pro zdivo [5], minimálně $6,5^\circ$ pro železobeton a minimálně $10,5^\circ$ pro ocel:

$$\psi = 2 \arctg(2 y / l) \quad (27)$$

kde y je maximální dosažený průhyb desky (ve středu rozpětí),

l je rozpětí konstrukce v kratším směru.

Při navrhování konstrukcí podle teorie mezních stavů bývá vhodnější zejména pro železobetonové konstrukce uvažovat místo meze únosnosti R_{tfd} moment na mezi únosnosti, případně i v kombinaci s normálovou silou. V případě programu [8] pro zjednodušený výpočet únosnosti konstrukce je výstupem programu průhyb a maximální moment od účinků výbuchu.

Obr.1 Příklad výpočtu parametrů tlakové vlny programem [7]

Zjednodušený výpočet tlakové vlny

1. Umístění a velikost výbušiny

a) vzdálenost objektu od epicentra výbuchu	R	1,00	[m]
b) hmotnost nálože	C _N	6,45	[kg]
c) typ nálože	Danubit I		
d) balistický poměr nálože	k _B	0,00	[-]
e) výška ohniska výbuchu nad terénem	h	0,00	[m]
výbuchové teplo	Q _V	4 396	[kJ/kg]
tlakový tritolový ekvivalent	k _{TNT-p}	1,047	[-]
koeficient těsnění nálože	k _E	1,00	[-]
koeficient geometrie šíření	k _G	2,00	[-]
hmotnost ekvivalentní nálože	C _W	13,5	[kg TNT]
redukovaná vzdálenost pro ekvivalentní hmotnost nálože	R ₋	0,42	[m/kg ^{1/3}]

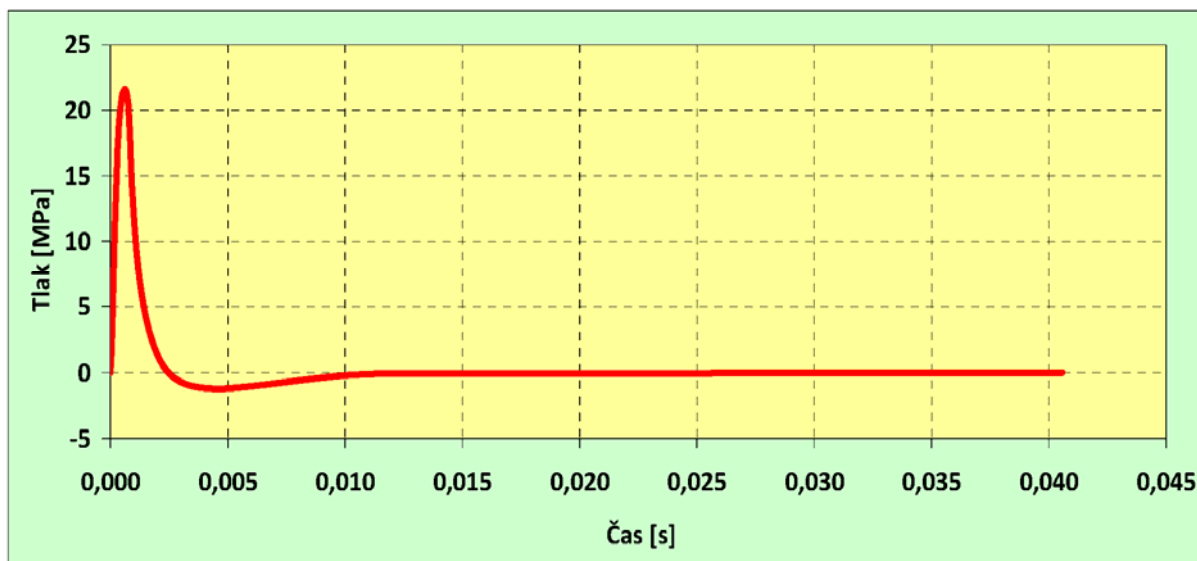
2. Parametry tlakové vlny

přetlak v tlakové vlně	p+	21,579	[MPa]
podtlak v tlakové vlně	p-	0,083	[MPa]
doba trvání přetlaku	t+	0,0025	[s]
doba trvání podtlaku	t-	0,0381	[s]
rychlost čela tlakové vlny	N	2 393,2	[m/s]
doba nárazu od odpálení	t	0,0004	[s]

3. Průběh tlakové vlny

	t [s]	p [MPa]
Okamžik odpálení	0	0,0000
Čtvrtina přetlakové fáze	t+/4	p+ 21,5791
Konec přetlakové fáze	t+	0,0000
Čtvrtina podtlakové fáze	t+ + t-/4	p- -0,0833
Konec podtlakové fáze	t+ + t-	0,0000

4. Graf průběhu tlakové vlny



Obr.2 Příklad výpočtu a posouzení zděné stěny programem [8]

Zjednodušený výpočet odevzy stěnodeskové konstrukce

1. Rozměry, okrajové podmínky a materiál stěnodesky

a) rozměry stěny, výška a šířka		l_x	2,700	[m]
		l_y	5,400	[m]
b) tloušťka stěny		h	0,500	[m]
c) okrajové podmínky	Kloubové připojení po celém obvodu (1)	typ	1	[-]
d) materiál	Zdivo, cihly plné, P10/M4	typ	8	[-]
e) součinitel duktility		k_m	1,0	[-]
modul pružnosti materiálu		E	473	[MPa]
Poissonův součinitel		ν	0,15	[-]
jednotková hmotnost materiálu		γ	18,00	[t/m ³]

2. Zatížení dopadající a odraženou vlnou

f) rovnoměrné zatížení na plochu stěnodesky		q	5 085,3	[kN/m ²]
g) doba trvání přetlaku		t_+	0,0078	[s]

3. Výpočet vlastní frekvence kmitání a dynamického součinitele

součinitel		λ^2	12,34	[-]
desková tuhost		D	5 035	[kNm]
hmota desky na jednotkovou plochu		μ	9,00	[t/m ²]
první vlastní kruhová frekvence		$\omega_{(1)}$	40,0	[1/s]
první vlastní frekvence		$f_{(1)}$	6,4	[Hz]
dynamický pružnoplastický součinitel		δ	0,155	[-]

4. Pomocný výpočet parametrů stěnodesky

poměr stran		l_x / l_y	0,500	[-]
název tabulky pro vyhledání parametrů			op1	
dolní mez pro vyhledávání			0,500	
horní mez pro vyhledávání			0,600	

5. Výpočet vnitřních sil pro posouzení stěnodesky

největší moment v poli ve směru x		m_x	575,87	[kNm]
největší moment v poli ve směru y		m_y	225,95	[kNm]
největší moment ve vetknutí ve směru x		m_{xv}	0,00	[kNm]
největší moment ve vetknutí ve směru y		m_{yv}	0,00	[kNm]

6. Výpočet průhybu a odhad porušení

největší průhyb		y	84,5	[mm]
odhad největšího natočení		φ	7,2	[deg]
úhel lomu zadaného materiálu		ψ	5,0	[deg]

odhad porušení konstrukce lomem

je pravděpodobné

Zatížení výbuchem podle ČSN EN 1991-1-7

Norma [9] byla zavedena do soustavy českých technických norem od ledna 2008. V soustavě eurokódů je zatížení výbuchem považováno za mimořádné zatížení a toto zatížení se uvažuje v mimořádných návrhových situacích.

Pro mimořádné situace se dílčí součinitele zatížení γ_f uvažují zpravidla rovny jedné. Výbuchy se musí uvažovat při navrhování všech částí pozemních a inženýrských staveb, ve kterých se používá plyn, nebo se plyn reguluje, nebo kde se skladují výbušné látky, jako jsou výbušné plyny nebo kapaliny tvořící výbušné páry, nebo kde se plyn skladuje nebo přepravuje (např. chemická zařízení, kontejnery, zásobníky, stavby pro odpadní vody, obytné budovy s instalacemi plynu, energovody, tunely pozemních a drážních komunikací). Účinky způsobené výbušninami norma nestanoví.

Tab.1 Kategorizace budov podle ČSN EN 1991-1-7 [9]

Třída následků	Příklady kategorizace a jejich používání
CC1 malá	Samostatné obytné domy do 4 podlaží. Zemědělské stavby. Stavby s občasným výskytem osob za předpokladu, že každá část takové stavby je vzdálena od další obytné budovy nebo oblasti navštěvované lidmi alespoň o 1,5 násobek výšky stavby.
CC2a střední – skupina menšího rizika	Samostatné 5 podlažní obytné domy. Hotely do 4 podlaží. Budovy s byty, apartmány a další rezidenční budovy do 4 podlaží. Administrativní budovy do 4 podlaží. Průmyslové stavby do 3 podlaží. Obchodní plochy do 3 podlaží, s plochou každého podlaží max. 1000 m ² . Školní zařízení o 1 podlaží. Veškeré budovy nepřesahující 2 podlaží, kde je povolen vstup veřejnosti a plocha jednotlivých podlaží je nanejvýš 2 000 m ² .
CC2b střední – skupina většího rizika	Hotely, budovy s byty, apartmány a další obytné budovy vyšší než 4 podlaží, avšak nanejvýš 15 podlažní. Školní zařízení vyšší než 1 podlaží, avšak nanejvýš 15 podlažní. Obchodní plochy vyšší než 3 podlaží, avšak nanejvýš 15 podlažní. Nemocnice do 3 podlaží. Administrativní budovy vyšší než 4 podlaží, avšak nanejvýš 15 podlažní. Všechny budovy s přístupem veřejnosti a s plochou podlaží větší než 2 000 m ² , avšak na každém podlaží nanejvýš 5 000 m ² . Parkoviště nanejvýš 6 podlažní.
CC3 velká	Všechny stavby, které přesahují omezení ploch jednotlivých podlaží a jejich počtu ve třídách následků CC2a a CC2b. Všechny stavby, kde se shromažďuje značný počet osob. Stadióny s více než 5 000 diváky. Stavby s nebezpečnými látkami nebo technologickými procesy.

U budov s instalovaným zemním plynem musí být konstrukce navržena tak, aby odolala účinkům vnitřního výbuchu plynu. Norma předepisuje vztahy pro nominální hodnotu ekvivalentního statického tlaku. Použije se větší z hodnot:

$$p_d = 3 + p_{\text{stat}} \quad \text{nebo} \quad (28)$$

$$p_d = 3 + p_{\text{stat}} / 2 + 0,04 / (A_v / V)^2 \quad (29)$$

kde p_{stat} je rovnoměrně rozdělený statický tlak, při kterém se poruší výfukové prvky v kN/m^2 ,

A_v plocha výfukových prvků v m^2 ,

V objem pravoúhlého prostoru v m^3 .

Výrazy (28) a (29) platí pro prostory s celkovým objemem do $1\,000\text{ m}^3$.

Pokud se na výfukové ploše podílejí stavební prvky s různými hodnotami p_{stat} , má se použít největší hodnota p_{stat} . Není potřebné uvažovat hodnotu tlaku p_d větší než 50 kN/m^2 .

Poměr plochy výfukových částí a celkového objemu má splnit nerovnost:

$$0,05 \leq A_v / V \leq 0,15. \quad (30)$$

Konstrukce zařazené podle tab.1 do třídy CC1 se nemusí posuzovat. Pro konstrukce v třídě CC2 A CC3 je nutné provést ekvivalentní statický výpočet a konečně pro konstrukce v třídě CC3 je nutné ještě provést i dynamický výpočet.

Odstupové vzdálenosti

Vzorec (31) je používán zejména pro zjednodušené posuzování nebezpečí účinků výbuchu v jaderné energetice [10] a také v armádě. Většina vzorců tohoto typu vychází ze vzorce (1) a upravuje jeho konstantu na pravé straně.

$$R_{ip} = 18 \cdot W^{1/3} \quad (31)$$

Tato konstanta 18 je vhodná pro stanovení přijatelné odstupové vzdálenosti mezi potenciálním zdrojem výbuchu a zatíženou konstrukcí. Přímka podle vzorce (31) vymezuje bezpečnou oblast, to znamená ve vzdálenostech pod touto přímkou může dojít k rozbití oken a drobným škodám, při které nejsou nutná žádná další opatření z hlediska konstrukce. Podle [10] se jedná o výbuchy, které v příslušné vzdálenosti generují rázovou vlnu s přetlakem na čele 7 kPa , jež lze pro konstrukci (zpravidla dobře ztuženou a v dobrém technickém stavu) považovat ještě za bezpečnou:

Závěr

Cílem příspěvku je porovnání zjednodušených empirických vzorců pro stanovení účinků výbuchu na konstrukce a současně i zjednodušení dynamické odezvy stěnodeskové konstrukce pružnoplastickým ekvivalentním statickým výpočtem. Vzhledem k nejistotám ve stanovení všech parametrů výbuchového zatížení je předložena zjednodušená metodika, která dostatečně výstižně umožňuje tyto parametry stanovit a na ně posoudit vlastní stavební konstrukci. Nejistotu ve stanovení parametrů výbuchového zatížení lze porovnat podle empirických vzorců, několika autorů, jež jsou v příspěvku uvedeny.

Analýza stavební konstrukce, ohrožené výbuchem je založena na ekvivalentním statickém výpočtu, vycházející ze soustavy s jedním stupněm volnosti a stanovením dynamického součinitele pro pružnoplastickou soustavu. Na základě maximálních momentů a průhybů konstrukce je posuzováno ohrožení konstrukce výbuchem.

Výsledky takto zjednodušené problematiky lze porovnat pomocí výpočetních programů [7, 8] i s metodikou uvažování výbuchového zatížení podle eurokódu [9]. Použité programy [7, 8], vypracované autory příspěvku a dostupné na webových stránkách ČVUT jsou jistě cenné pro rychlý a dostatečně inženýrsky oprávněný odhad porušení konstrukce zatížené výbuchem.

Poděkování

Práce na této problematice vznikla za podpory projektem GAČR: 103/08/0859 „Odezva konstrukci při statických a dynamických zatíženích působených přírodní a lidskou činností“. Autoři si dovoluji touto cestou vyslovit grantové agentuře za její podporu svůj dík.

Literatura

- [1] Henrych, J.: Dynamika výbuchu a jeho užití, Academia, Praha 1973.
- [2] Koloušek, V. a kol.: Stavebné konštrukcie namáhané dynamickými účinkami. SVTL, Bratislava 1967.
- [3] Korenev, B. G. a kol.: Dinamicheskij rascot sooruzhenij na specialnyje vozdejstvija. Spravochnik, Strojizdat, Moskva 1981.
- [4] Makovička, D.: Shock Wave Load of Window Glass Plate Structure and Hypothesis of Its Failure. In: Structures Under Shock and Impact '98. Computational Mechanics Publications, WIT Press, p. 43-52, Southampton 1998..
- [5] Makovička, D., Makovička, D.: Vliv opakovaných extrémních zatížení na ohybovou únosnost zdiva, Stavební obzor, 2006, č.2, s. 37-43.
- [6] Makovička, D., Janovský, B.: Příručka protivýbuchové ochrany staveb, Česká technika – nakladatelství ČVUT v Praze, 2008.
- [7] Makovička, D., Makovička, D.: Zjednodušený výpočet tlakové vlny, http://pvoch.cvut.cz/vypocet_vlny/, Praha 2009.
- [8] Makovička, D., Makovička, D.: Zjednodušený výpočet odezvy stěnodeskové konstrukce, http://pvoch.cvut.cz/odezva_desky/, Praha 2009.
- [9] ČSN EN 1991-1-7 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-7: Obecná zatížení - Mimořádná zatížení. ČNI, Praha 2007.
- [10] U. S. Nuclear Regulatory Commision: Evaluation of explosions postulated to occur on transportation Routes near nuclear power plant sites. USNRC regulatory Guide 1.91, 1978.