



Analiza oddziaływania wybuchu wewnętrznego na przegrody budowlane

JAROSŁAW SIWIŃSKI, ADAM STOLARSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
Instytut Inżynierii Lądowej, 00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
jaroslaw.siwinski@wat.edu.pl, astolarski@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy rozważono oddziaływanie wybuchu wewnętrznego na przegrody budowlane. Wyznaczenie maksymalnej wartości ciśnienia szczytowego na czole fali wybuchu wewnętrznego przedstawiono na podstawie analizy fal odbitych. Zmienność w czasie oddziaływania wybuchu wewnętrznego opisuje wyłącznie fazę nadciśnienia. Analizę obciążenia od detonacji ładunku wewnętrznego przeprowadzono dla warunków niezaburzonej atmosfery standardowej (MAS). Opracowano stabelizowany algorytm wyznaczania obciążeń uwzględniający charakterystyki geometryczne przegród budowlanych i pomieszczeń, w których następuje detonacja, oraz parametry ośrodka wybuchu.

Słowa kluczowe: budownictwo, oddziaływania wybuchowe, wybuch wewnętrzny, ładunek punktowy TNT

DOI: 10.5604/12345865.1157345

1. Wstęp

W pracy przedstawiono problematykę dotyczącą określania nadciśnienia fali powstałej w wyniku wybuchu ładunku materiału wybuchowego zlokalizowanego wewnątrz obiektu budowlanego.

Do najbardziej powszechnych metod wyznaczania obciążeń wybuchowych w pomieszczeniach w sposób analityczny należą metody Kinneya (1985) [8], Włodarczyka (1994) [14], natomiast jedne z nowszych opracowań to metoda Cormiego, Smitha, Maysa (2009) [4]. Innym sposobem wyznaczania obciążeń jest korzystanie z oprogramowania do wyznaczania obciążeń wybuchowych, np. SBEDS (*Single-degree-of-freedom Blast Effects Design Spreadsheet*), którego używano m.in.

w pracy Zapaty i Weggela (2008) [16]. Innym stosowanym oprogramowaniem tego typu jest moduł obciążenia od wybuchu zawarty w programie metody elementów skończonych LS-DYNA, który został zastosowany w pracy He, Chen i Guo (2011) [7], czy moduł obciążenia wybuchowego w programie Abaqus zastosowany w pracy Wu i in. (2015) [15]. W literaturze najczęściej spotyka się analizy oddziaływania wybuchów wewnętrznych dla konstrukcji tuneli, w których nie uwzględnia się powierzchni upustowych (Bulson (1997) [2], Feldgun i in. (2008) [6], Tiwari i in. (2014) [12], Wu i in. (2015) [15]). W pracy He, Chena i Guo (2011) [7] zaprezentowano analizę zachowania konstrukcji stacji metra przy zastosowaniu modułów obliczeniowych obciążenia wybuchowego w programie LS-DYNA. Podkreślić należy, że zaimplementowane do programów obliczeniowych moduły obciążeń oparte są na metodach analitycznych, modyfikowanych na potrzeby określonego oprogramowania. Metody analityczne przedstawione w niniejszej pracy stanowią podstawę wyznaczenia obciążenia od wybuchu ładunku materiału wybuchowego. Znane są również opracowania zawierające analizę oddziaływania wewnętrznego wybuchu mieszanin gazowo-powietrznych na konstrukcje budynków (Chyży, 2009 [3]).

W pracy Siwińskiego i Stolarskiego (2015) [10] przedstawiono analizę oddziaływania wybuchu zewnętrznego na przegrody budowlane. Z pracy tej zaczerpnięto niektóre wyrażenia bezpośrednio wykorzystane w procedurze wyznaczania analizy oddziaływania wybuchu wewnętrznego na przegrody budowlane.

Celem pracy jest opracowanie algorytmu postępowania przy wyznaczaniu charakterystyk oddziaływania wybuchu wewnętrznego oraz przeprowadzenie analizy wpływu zmiennych parametrów geometrycznych ośrodka wybuchu na funkcję zmiany obciążenia w czasie.

W niniejszej pracy zastosowano fenomenologiczny sposób wyznaczania obciążeń na przegrody budowlane od wybuchu ładunku materiału wybuchowego zlokalizowanego w wewnętrznych pomieszczeniach konstrukcji. Podano przykłady obliczania parametrów obciążenia (wartości ciśnienia, zmiany ciśnienia w czasie i czasu trwania obciążenia) od wybuchu ładunku trotylu na wewnętrzne przegrody konstrukcji budynków, z uwzględnieniem kształtu i proporcji wymiarów geometrycznych pomieszczeń oraz występowania powierzchni upustowych zmniejszających nadciśnienie. Obliczenia parametrów obciążenia wybuchowego na wewnętrzne przegrody pomieszczeń budynku przeprowadzono, przyjmując założenia upraszczające polegające na: (1) posługiwaniu się formułami aproksymacyjnymi, (2) traktowaniu wewnętrznego pomieszczenia budynku jako wyodrębnionego układu przegród, na który oddziałuje wyłącznie obciążenie od ładunku wybuchowego, (3) uwzględnieniu wpływu oddziaływania fal obciążenia odbitych od przeciwnych lub sąsiednich przegród w pomieszczeniu.

2. Charakterystyka oddziaływania ładunku materiału wybuchowego na wewnętrzne elementy konstrukcyjne

W pracy rozważono oddziaływanie ładunku umieszczonego wewnątrz pomieszczeń konstrukcji budynków.

Występują dwie możliwości określenia efektów wybuchu wewnętrznego, tj. z uwzględnieniem lub bez uwzględnienia powierzchni upustowej. W przypadku braku powierzchni upustowej konstrukcja musi przejąć większe obciążenia niż w przypadku występowania powierzchni upustowych, które umożliwiają redukcję ciśnienia, np. przez wyłamanie okien, drzwi, przegród działowych, osłon wlotów kanałów wentylacyjnych lub otwarcie specjalnych urządzeń upustowych.

Zapewnienie powierzchni upustowych ciśnienia w budynkach może być korzystne dla ochrony konstrukcji przed kumulowaniem się potencjalnie szkodliwego ciśnienia gazu powybuchowego. Jednak dla ochrony osób znajdujących się w budynku stosowanie powierzchni upustowej ciśnienia nie musi być korzystne, ponieważ największe straty i tak będą związane zasadniczo tylko z początkową fazą działania fali uderzeniowej, jeszcze przed otwarciem powierzchni upustowej.

Rozważania oddziaływania ładunku wewnętrznego przedstawiono na podstawie analizy fal odbitych.

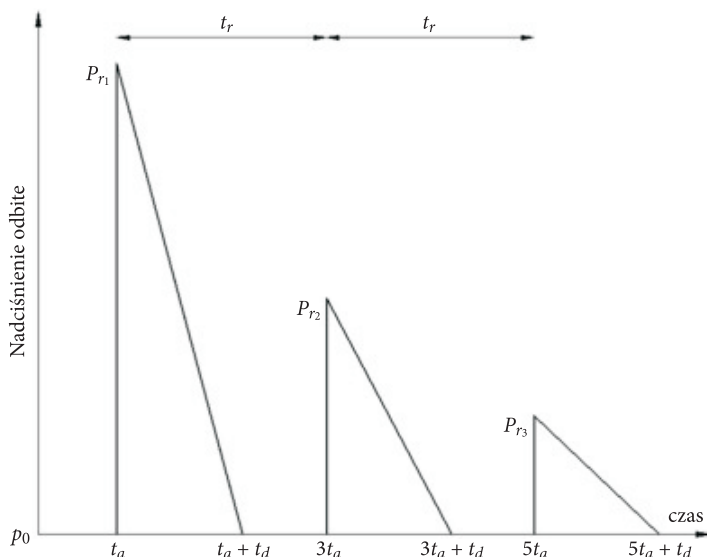
Detonacja skondensowanych materiałów wybuchowych w wewnętrznych pomieszczeniach konstrukcji budowlanych następuje w dwóch fazach — Cormie, Smith i Mays (2009) [4]. Pierwsza faza określa uderzenie fali podmuchowej. W drugiej fazie początkowa fala obciążenia jest odwzorowana przez kilka impulsów z powodu powtarzającego się procesu odbijania fal od przegród zlokalizowanych w bliskich odległościach. Zmiany ciśnienia następują zazwyczaj przez nakładanie się kolejnych amplitud ciśnienia. Odbijające się fale uderzeniowe — tzw. fale Macha — powodują zwiększenie ciśnienia wewnątrz konstrukcji. Zjawisko to nazywane jest ciśnieniem gazu powybuchowego.

3. Parametry obciążenia wybuchem na wewnętrzne przegrody obiektów budowlanych

3.1. Zmienność nadciśnienia fal odbitych w czasie

Wartości parametrów początkowych ciśnienia fali uderzeniowej są dość łatwe do określenia — Smith i Hetherington (1994) [11]. Natomiast kwantyfikacja ponownego odbicia fal jest na ogół trudniejsza, szczególnie w sytuacji, gdy fale Macha są ciągle wytwarzane. Możliwe jest wówczas przybliżone określenie ciśnienia wewnętrznego w zależności od czasu poprzez idealizowanie impulsów uderzeniowych jako

serii następujących po sobie i zmniejszających się skokowych (tj. bez fazy wzrostu ciśnienia) impulsów nadciśnienia (rys. 1).



Rys. 1. Idealizacja zmiany w czasie nadciśnienia odbitego

Baker i Cox (1983) [1] zaproponowali podejście oparte na założeniu, że ciśnienie szczytowe w każdym odbiciu fali zmniejsza się o połowę, a czas trwania każdego impulsu jest stały zgodnie z idealizacją przedstawioną na rysunku 1. W idealizacji tej uwzględnia się trzy pierwsze odbicia. Maksymalne wartości ciśnienia kolejnych odbitych fal można opisać następująco:

$$p_{r2} = \frac{1}{2} p_{r1}, \quad p_{r3} = \frac{1}{2} p_{r2} = \frac{1}{4} p_{r1}, \quad p_{r4} = 0. \quad (1)$$

Analogiczne zależności obowiązują dla impulsów nadciśnienia kolejnych fal odbitych:

$$i_{r2} = \frac{1}{2} i_{r1}, \quad i_{r3} = \frac{1}{2} i_{r2} = \frac{1}{4} i_{r1}, \quad i_{r4} = 0. \quad (2)$$

Czas (okres) odbicia t_r , określany jako czas opóźnienia czasowego pomiędzy każdą kolejną falą uderzeniową przybywającą na powierzchnię konstrukcji, zakłada się jako stały:

$$t_r = 2t_a, \quad (3)$$

gdzie t_a jest czasem przybycia pierwszej fali uderzeniowej na powierzchnię odbijającą.

W celu wyznaczenia czasu przybycia pierwszej fali uderzeniowej na powierzchnię odbijającą korzystamy z zależności:

$$t_a = \frac{r}{D}, \quad (4)$$

gdzie: r — odległość ładunku od punktu obciążenia;
 D — prędkość na czole fali uderzeniowej określona zależnością wg Krzewińskiego (1982) [9]:

$$D = \sqrt{a_0^2 + \frac{\Delta p^+ (\alpha_Q + 1)}{2\rho}}, \quad (5)$$

gdzie: α_Q — współczynnik zależny od ciepła właściwego wybuchu Q , który wg Krzewińskiego (1982) [9] należy przyjmować w przedziale $\langle 1,2; 1,4 \rangle$;
 a_0 — prędkość rozchodzenia się dźwięku w ośrodku;
 ρ — gęstość ośrodka, w którym następuje detonacja ładunku, dla ośrodka powietrznego $\rho = 1,227 \text{ kg/m}^3$;
 Δp^+ — przyrost nadciśnienia na czole fali uderzeniowej wyznaczony wg zależności opisanej przez drugą zmienną Sachsa [10]:

$$\Delta p^+ = p_0 \cdot p_s \quad (6)$$

gdzie: p_0 — ciśnienie początkowe w ośrodku utożsamianym z ciśnieniem atmosferycznym;
 p_s — bezwymiarowe nadciśnienie.

Założenia określone zależnościami (1) i (2) nie są do końca zgodne z doświadczeniem Bakera i Coxa (1983) [1], ponieważ w rzeczywistości kolejne impulsy będą słabsze i fale będą rozchodzić się wolniej niż pierwsza.

3.2. Nadciśnienie na czole fali odbitej

W równaniu (1) wartość nadciśnienia pierwszej fali odbitej p_{r1} można określić na podstawie odpowiedniego wyrażenia zawartego w pracy [10] jako równe:

$$p_{r1} = \Delta p_{od} \quad (7)$$

gdzie Δp_{od} to wartość nadciśnienia na czole fali odbitej wg formuły:

$$\Delta p_{od} = 2\Delta p^+ + \frac{6\Delta p^{+2}}{\Delta p^+ + 7p_0}. \quad (8)$$

Bezwymiarowe nadciśnienie na czole fali uderzeniowej jest wyznaczane w zależności od parametru pomocniczego λ_t , określanego formułą:

$$\lambda_t = \frac{r}{\sqrt[3]{m}}, \quad (9)$$

gdzie: r — odległość ładunku od punktu, w którym obliczamy parametry wybuchu [m];
 m — masa ładunku materiału wybuchowego [kg].

W zależności od wartości parametru λ_t w tabeli 1 przedstawiono podstawowe wyrażenia do określania parametrów bezwymiarowego nadciśnienia, które zostały szczegółowo opisane w pracy [10].

TABELA 1

Bezwymiarowe nadciśnienie

| λ_t | p_s | |
|-------------|---|------|
| < 0,05 | ładunek kontaktowy | |
| 0,05-0,3 | $14,07\lambda_t^{-1} + 5,54\lambda_t^{-2} - 0,3572\lambda_t^{-3} + 0,00625\lambda_t^{-4}$ | (10) |
| 0,3-1 | $6,194\lambda_t^{-1} - 0,326\lambda_t^{-2} + 2,1324\lambda_t^{-3}$ | (11) |
| 1-10 | $0,754\lambda_t^{-1} + 2,457\lambda_t^{-2} + 6,5\lambda_t^{-3}$ | (12) |
| > 10 | $p_{s,1} = A_1\lambda^{-1}, p_{s,2} = A_2\lambda^{-1}(\ln\lambda)^{-1/2}, p_{s,3} = A_3\lambda^{-4/3}$ $\lambda = \left(\frac{Q}{p_0}\right)^{-1/3} \lambda_t$ | (13) |

3.3. Czas trwania nadciśnienia

Czas t_d , określony jak na rysunku 1, przyjmujemy jako zastępczy czas trwania każdego impulsu nadciśnienia równy:

$$t_d = \tau^+. \quad (14)$$

Wartość czasu trwania obciążenia τ^+ jest zależna od strefy, w której występuje obciążenie wybuchem i przedstawia się ją na podstawie formuł opisanych w pracy [10]:

$$\tau^+ = \begin{cases} 9 \frac{r_0}{a_0} & \text{dla } \lambda < 25 \\ 1,8 \frac{r_0}{a_0} \sqrt{\lambda} & \text{dla } 25 \leq \lambda \leq 150 \\ 4,2 \frac{r_0}{a_0} \sqrt[3]{\lambda} & \text{dla } \lambda > 150, \end{cases} \quad (15)$$

gdzie λ jest pierwszą bezwymiarową zmienną Sachsa określoną zależnością:

$$\lambda = \frac{r}{r_0} = \left(\frac{Q}{p_0} \right)^{-1/3} \lambda_t, \quad (16)$$

gdzie: r_0 — zastępczy promień ładunku $r_0 = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho_0}}$;

$\rho_0 = 1560 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ — gęstość ładunku materiału wybuchowego (TNT).

3.4. Upust ciśnienia i zmienność ciśnienia zastępczego w czasie

Zjawisko wielokrotnego powstawania fal odbitych można przedstawić w formie zastępczego impulsu ciśnienia gazu powybuchowego. Parametry tego zastępczego impulsu ciśnienia zależą od wielkości pomieszczenia, wielkości wszystkich otworów upustowych znajdujących się w pomieszczeniu oraz właściwości materiałów wybuchowych. Typowy rozkład ciśnienia w czasie dla przykładowej konstrukcji z powierzchniami upustowymi przedstawiony jest na rysunku 2 (Cormie, Mays i Smith, 2009 [4]).

Na rysunku 2 zauważyć możemy serię fal odbitych (w przybliżeniu pierwsze trzy dominujące) potwierdzających prawidłowość modelu oddziaływania rozwijania się obciążenia ciśnienia powybuchowego opisanego idealizacją wg rysunku 1 i równaniem (1).

W przypadku gdy czas t_f reakcji obciążonej konstrukcji jest znacznie dłuższy niż łączny czas trwania obciążenia t_k określony zależnością:

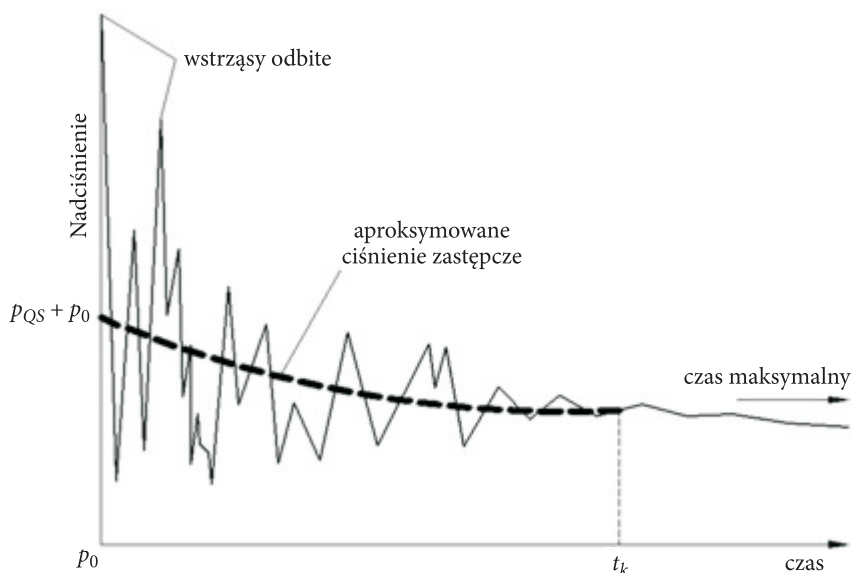
$$t_k = (5t_a + t_d), \quad (17)$$

wówczas zgodnie z propozycją Bakera założyć możemy, że wszystkie trzy impulsy mogą być zastąpione jednym zastępczym impulsem:

$$i_{rT} = i_{r1} + i_{r2} + i_{r3} = 1,75i_{r1}, \quad i_{r1} \approx \frac{1}{2} p_{r1} t_d, \quad (18)$$

o łącznym ciśnieniu szczytowym określonym według zależności:

$$p_{QS} = p_{r1} + p_{r2} + p_{r3} = 1,75 p_{r1}. \quad (19)$$



Rys. 2. Nadciśnienie fal odbitych w czasie

Taka aproksymacja obciążenia może być uzasadniona przy określaniu reakcji przegród wewnętrznych konstrukcji przy projektowaniu. Korzystanie z tej aproksymacji prowadzi do przeszacowania reakcji obciążonej przegrody, a w konsekwencji do bardziej zachowawczego (ale i bardziej bezpiecznego) projektowania.

Baker i Cox (1983) [1] zaprezentowali podejście pozwalające na kwantyfikację najważniejszych parametrów wykresu ciśnienia w czasie za pomocą przybliżonej formy opisu ciśnienia. Przybliżone równanie aproksymujące rzeczywisty wykres rozkładu ciśnienia w czasie opisuje zależność:

$$p(t) = (p_{QS} + p_0) e^{(-a_m t)}. \quad (20)$$

W równaniu tym najważniejszą rolę odgrywa parametr a_m — współczynnik modyfikujący czas, określony zależnością:

$$a_m = 2,13 \frac{a_e A_S a_0}{V}, \quad (21)$$

gdzie: $a_e = \frac{A_U}{A_p}$ — stosunek wszystkich powierzchni upustowych A_U

do wewnętrznej powierzchni rozważanej przegrody w pomieszczeniu A_p ;

$A_S = \sum A_p$ — całkowita powierzchnia przegród otaczających pomieszczenie, w którym nastąpił wybuch;

V — kubatura pomieszczenia, w którym nastąpił wybuch;

a_0 — prędkość dźwięku w ośrodku (atmosferze) pomieszczenia wybuchu;

t — czas w okresie trwania zastępczego oddziaływania wybuchowego $\langle 0, t_k \rangle$, w którym określamy wartość nadciśnienia.

Równanie (20) opisuje rozkład zastępczego impulsu ciśnienia w czasie. W chwili początkowej $t = 0$ następuje skokowy przyrost ciśnienia aż do osiągnięcia wartości szczytowej; w kolejnych chwilach czasowych następuje spadek ciśnienia trwający do chwili t_k określającej zakończenie procesu obciążenia.

Wyniki doświadczeń eksperymentalnych przeprowadzonych przez Weibulla (1968) [13] w zakresie wyznaczenia wartości szczytowej nadciśnienia wybuchu wewnętrznego, czasu trwania nadciśnienia oraz wartości impulsu nadciśnienia, wg opracowania Cormiego Smitha i Maysa (2009) [4], wykazują dużą zbieżność z wynikami wyznaczonymi na podstawie formuły aproksymacyjnej (20).

4. Algorytm wyznaczania przebiegu wybuchu od ładunku wewnętrznego

TABELA 2

Algorytm wyznaczania obciążenia wybuchowego przy detonacji ładunku wewnętrznego

| Lp. | Procedura | Oznaczenie parametru | Formuła określająca parametr |
|-----|--|----------------------|------------------------------|
| 1 | Określić parametry geometryczne pomieszczenia | A_w, A_s, V | (21) |
| 2 | Wyznaczyć masę ładunku | m | |
| 3 | Wyznaczyć promień ładunku | r_0 | (16) |
| 4 | Wyznaczyć współczynnik pomocniczy | λ_t | (9) |
| 5 | Wyznaczyć bezwymiarowe nadciśnienie w zależności od bezwymiarowej odległości | p_s | (10), (11), (12), (13) |
| 6 | Wyznaczyć przyrost nadciśnienia | Δp^+ | (6) |
| 7 | Wyznaczyć nadciśnienie na czole fali odbitej | Δp_{od} | (8) |
| 8 | Wyznaczyć maksymalne ciśnienie szczytowe fal odbitych | p_{QS} | (19) |
| 9 | Wyznaczyć prędkość na czole fali uderzeniowej | D | (5) |
| 10 | Wyznaczyć czas przybycia pierwszej fali | t_a | (4) |
| 11 | Wyznaczyć zastępczy czas trwania nadciśnienia | t_d | (14) |
| 12 | Wyznaczyć maksymalny czas trwania nadciśnienia | t_k | (17) |
| 13 | Wyznaczyć bezwymiarowy współczynnik modyfikujący czas | τ | (21) |
| 14 | Wyznaczyć przebieg zmienności w czasie | $p(t)$ | (20) |

Na podstawie rozważań dotyczących oddziaływania wybuchu wewnętrznego na przegrody budowlane w tabeli 2 przedstawiono algorytm wyznaczania parametrów obciążenia wybuchowego przy detonacji ładunku wewnętrznego.

5. Analiza obciążenia od detonacji ładunku wewnętrznego

Analizę obciążenia od detonacji ładunku wewnętrznego przeprowadzono dla warunków niezaburzonej atmosfery standardowej (MAS) charakteryzującej się parametrami:

$$p_0 = 101325 \text{ Pa} \cong 0,1 \text{ MPa},$$

$$p_1 = 1,227 \text{ kg/m}^3,$$

$$T = 288 \text{ K},$$

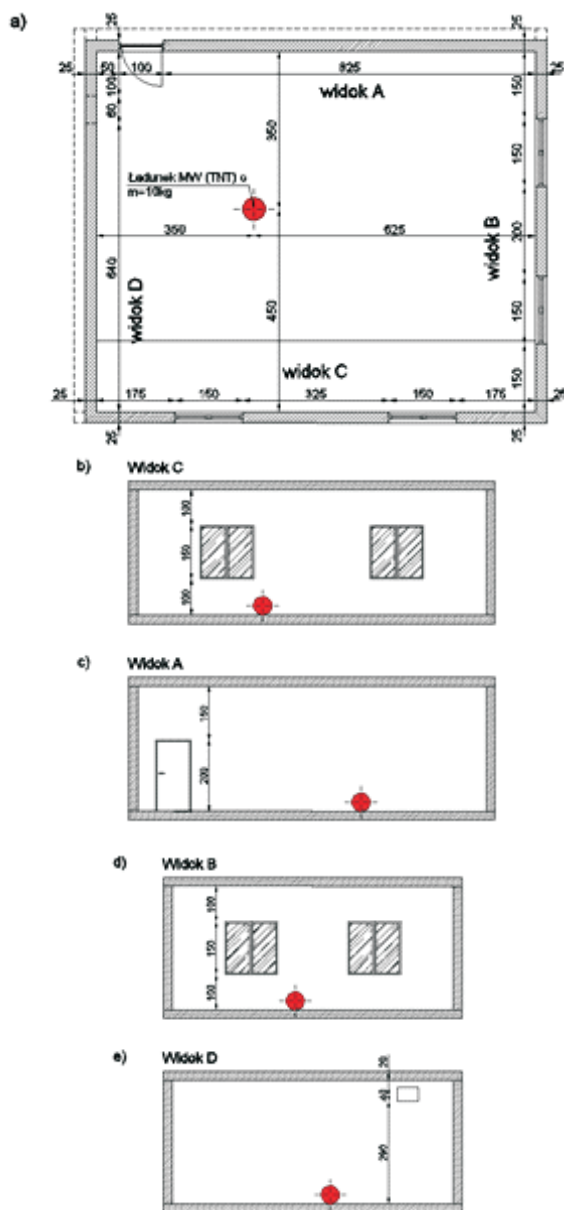
$$a_0 = 340 \text{ m/s}.$$

Analizę przeprowadzono przy następujących założeniach:

- kształt ładunku: kulisty,
- podłoże: sztywne,
- rodzaj ładunku: TNT,
- masa ładunku: $m = 10 \text{ kg}$,
- gęstość ładunku: $\rho_0 = 1560 \text{ kg/m}^3$,
- geometria pomieszczenia.

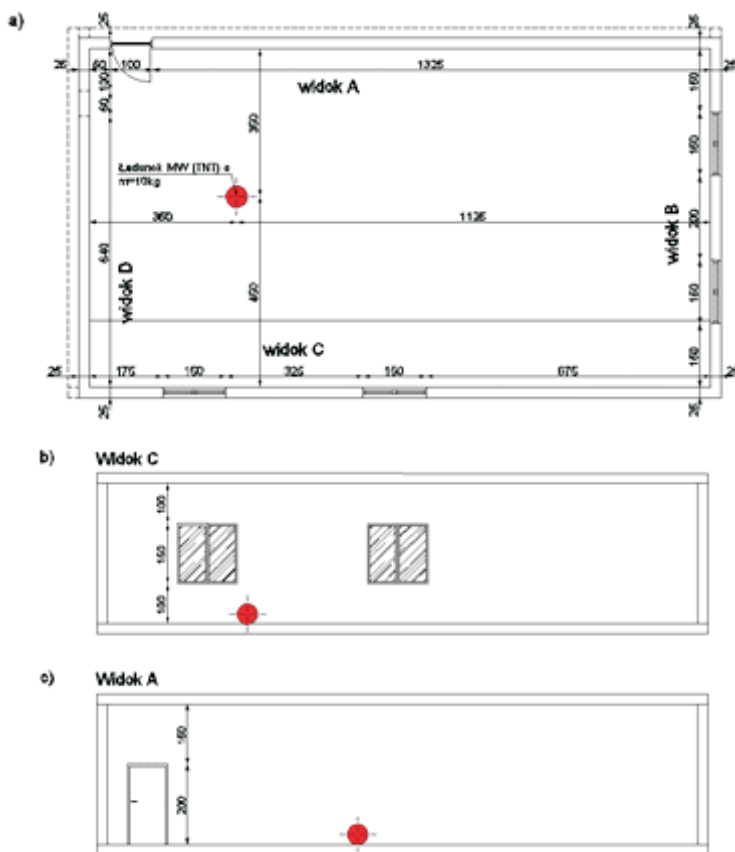
Rozpatrywano dwa typy pomieszczeń:

- (1) pomieszczenie typu I, według rysunku 3, prostopadłościenne o kubaturze $V = 273 \text{ m}^3$; powierzchnie upustowe: okna, drzwi, otwór wentylacyjny — w sumie $A_U = 11,24 \text{ m}^2$; powierzchnie poszczególnych przegród: $A_{PA} = A_{PC} = 34,1 \text{ m}^2$, $A_{PB} = A_{PD} = 28,0 \text{ m}^2$; łączne pole powierzchni wszystkich przegród z uwzględnieniem powierzchni podłogi i sufitu — $A_S = 280,2 \text{ m}^2$;
 - usytuowanie ładunku dla pomieszczenia typu I: na posadzce w odległościach $r_A = r_D = 3,5 \text{ m}$ od ściany A i D, $r_C = 4,5 \text{ m}$ od ściany C i $r_B = 6,25 \text{ m}$ od ściany B;
- (2) pomieszczenie typu II, według rysunku 5 prostopadłościenne, wydłużone, o kubaturze $V = 413 \text{ m}^3$; powierzchnie upustowe: okna, drzwi, otwór wentylacyjny — w sumie $A_U = 11,24 \text{ m}^2$; powierzchnie poszczególnych przegród: $A_{PA} = A_{PC} = 51,6 \text{ m}^2$, $A_{PB} = A_{PD} = 28,0 \text{ m}^2$; łączne pole powierzchni wszystkich przegród z uwzględnieniem powierzchni podłogi i sufitu — $A_S = 395,2 \text{ m}^2$;
 - usytuowanie ładunku dla pomieszczenia typu II: na posadzce w odległościach $r_A = r_D = 3,5 \text{ m}$ od ściany A i D, $r_C = 4,5 \text{ m}$ od ściany C i $r_B = 11,25 \text{ m}$ od ściany B.



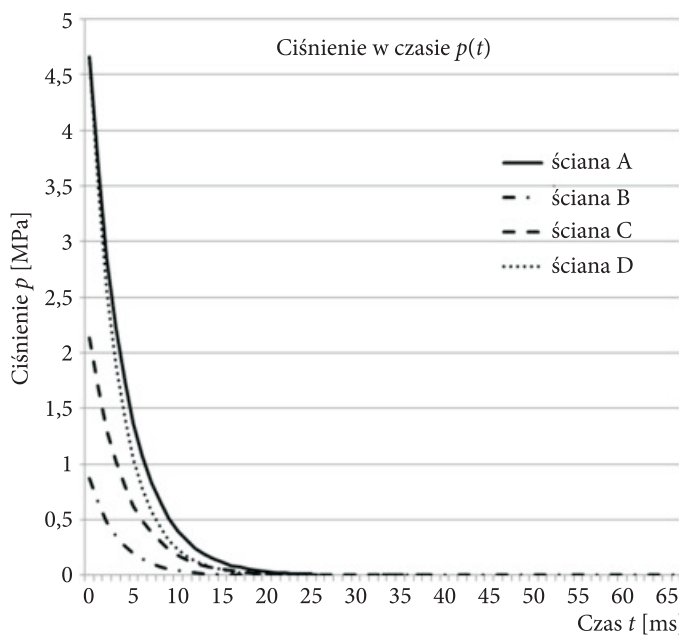
Rys. 3. Schemat rozmieszczenia ładunku materiału wybuchowego (MW) — pomieszczenie typu I:
 a) rzut poziomy; b), d) widok ścian C i B z dwoma otworami okiennymi; c) widok ściany A z otworem
 drzwiowym; e) widok ściany A z otworem wentylacyjnym

Na rysunku 4 przedstawiono schemat rozmieszczenia ładunku materiału wybuchowego w pomieszczeniu typu II. Nie przedstawiono widoku ścian B i D, ponieważ są one identyczne jak w pomieszczeniu typu I.

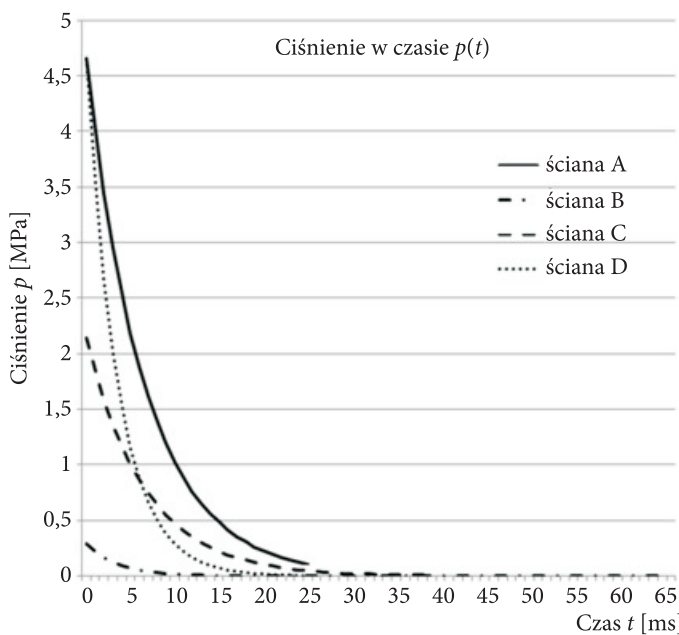


Rys. 4. Schemat rozmieszczenia ładunku materiału wybuchowego (MW) — pomieszczenie typu II: a) rzut poziomy; b) widok ściany C; c) widok ściany A

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki zmian nadciśnienia w czasie na przegrodach A, B, C i D dla pomieszczenia typu I. Wyznaczono czasy trwania obciążenia dla poszczególnych przegród: $t_{kA}^I = 26$ ms, $t_{kB}^I = 67$ ms, $t_{kC}^I = 40$ ms, $t_{kD}^I = 26$ ms. Zauważyć możemy różnicę w przebiegu nadciśnienia w czasie na przegrodach A i D pomimo takiej samej odległości ładunku. Różnica ta wynika z wielkości pola powierzchni przegrody, na której rozważamy oddziaływanie wybuchu. Na różnicę przebiegu funkcji ciśnienie–czas na przegrodach B i C największy wpływ ma zróżnicowana odległość ładunku od przegrody.



Rys. 5. Wykres naciśnienia w czasie dla wybuchu wewnętrznego na przegrodach A, B, C i D dla pomieszczenia typu I



Rys. 6. Wykres naciśnienia w czasie dla wybuchu wewnętrznego na przegrodach A, B, C i D dla pomieszczenia typu II

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki zmian nadciśnienia w czasie na przegrodach A, B, C i D dla pomieszczenia typu II. W tym przypadku czasy trwania obciążenia dla poszczególnych przegród wynoszą: $t_{kA}'' = 26$ ms, $t_{kB}'' = 148$ ms, $t_{kC}'' = 40$ ms, $t_{kD}'' = 26$ ms. Zauważamy, że wartości szczytowe nadciśnienia nie zależą od danych geometrycznych pomieszczenia, a jedynie od odległości ładunku od rozważanej przegrody. Natomiast istotne różnice zauważamy w przebiegu funkcji zmiany nadciśnienia w czasie, ponieważ zależą one od wszystkich parametrów geometrycznych przegród wraz z powierzchniami upustowymi i całego pomieszczenia. Różnice te mają znaczący wpływ na globalne wyężenie przegród pomieszczenia w konstrukcji pod wpływem oddziaływania wybuchu ładunku skupionego.

6. Zakończenie

W wyniku przeprowadzonego przeglądu formuł różnych autorów dotyczących wyznaczania oddziaływań wybuchowych, opracowano własny algorytm umożliwiający efektywne określenie podstawowych parametrów zastępczego impulsu ciśnienia powstałego w wyniku wybuchu ładunku skupionego wewnątrz pomieszczenia. Na podstawie opracowanej procedury wyznaczania ciśnienia przedstawiono wyniki analizy dla konkretnych przykładów obliczeniowych oddziaływania wybuchowego na wewnętrzne przegrody pomieszczeń o zróżnicowanych parametrach geometrycznych. Wykazano istotny wpływ parametrów geometrycznych przegród i pomieszczenia na parametry zastępczego impulsu ciśnienia od wybuchu.

Praca powstała w wyniku zadań badawczych zrealizowanych w ramach pracy badawczej statutowej nr 855, realizowanej w Wydziale Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej im. Jarosława Dąbrowskiego.

Artykuł wpłynął do redakcji 27.02.2015 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 5.05.2015 r.

LITERATURA

- [1] BAKER W.E., COX P.A., WESLINA P.S., KULESZ J.J., STREHLOW R.A., *Explosion Hazards and Evaluation*, Elsevier Scientific Publ. comp., Amsterdam–Oxford–New York, 1983.
- [2] BULSON P.S., *Explosive loading of engineering structures*, Taylor & Francis, London and New York, 1997.
- [3] CHYŻY T., *Metoda analizy budynków mieszkalnych obciążonych nadciśnieniem w strefie wewnętrznej wybuchu gazu*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, 2009.
- [4] CORMIE D., SMITH P., MAYS G., *Blast effect on buildings*, Cranfield University at the Defence Academy of the United Kingdom, London, 2009.
- [5] CUDZIŁO S., MARANDA A., NOWACZEWSKI J., TRĘBIŃSKI R., TRZCIŃSKI W.A., *Wojskowe materiały wybuchowe*, Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Częstochowa, 2000.

- [6] FELDGUN V.R., KOCHETKOV A.V., KARINSKI Y.S., YANKELEVSKY D.Z., *Internal blast loading in a buried lined tunnel*, International Journal of Impact Engineering, Elsevier, 35, 2008, 172-183.
- [7] HE W., CHEN J., GUO J., *Dynamic analysis of subway station subjected to internal blast loading*, Journal of Central South University Technology, 18, Springer, 2011, 917-924.
- [8] KINNEY G.F., *Explosive shocks in air*, Springer Science + Business Media, New York, 1985.
- [9] KRZEWIŃSKI R., *Dynamika wybuchu; Część I. Metody określania obciążeń*, WAT, Warszawa, 1982; *Część II. Działanie wybuchu w ośrodkach inercyjnych*, WAT, Warszawa, 1983.
- [10] SIWIŃSKI J., STOLARSKI A., *Analiza oddziaływania wybuchu wewnętrznego na przegrody budowlane*, Biul. WAT, 64, 2, Warszawa, 2015.
- [11] SMITH P.D., HETHERINGTON J.G., *Blast and Ballistic Loading of Structures*, Butterworth-Heinemann, Oxford, 1994.
- [12] TIWARI R., CHAKRABORTY T., MATSAGAR V., *Dynamic analysis of underground tunnels subjected to internal blast loading*, World Congress of Computational Mechanics (WCCM XI), Barcelona, 2014.
- [13] WEIBULL H.R.W., *Pressure recorded in partially closed chambers at explosion of TNT charges*, Annals of the New York Academy of Sciences, 152 (Article 1), New York, 1968, 357-361.
- [14] WŁODARCZYK E., *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa, 1994.
- [15] WU D., GAO B., SHEN Y., ZHOU J., CHEN G., *Damage evolution of tunnel portal during the longitudinal propagation of Rayleigh waves*, 75, Springer, Dordrecht, 2015, 2519-2543.
- [16] ZAPATA B., WEGGEL D., *Collapse study of an unreinforced masonry bearing wall building subjected to internal blast loading*, Journal of Performance of Constructed Facilities, 22, 2, 2008, 92-100.

J. SIWIŃSKI, A. STOLARSKI

Analysis of the internal explosion affecting building barriers

Abstract. In this paper we considered the action of an internal explosion onto building barriers. Determination of the maximum peak pressure on the forehead of an internal wave explosion was presented on the basis of the analysis of reflected waves. Variability in time of the action of an internal explosion describes overpressure phase only. Load analysis of internal cargo detonation was carried out for the standard atmosphere undisturbed conditions. We developed the tabulated algorithm for determination of loadings taking into account the geometric characteristics of the building barriers and rooms in which the detonation occurs and parameters of explosion environment.

Keywords: civil engineering, explosive actions, internal explosion, concentrate explosive

