



## Analiza oddziaływania wybuchu zewnętrznego 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 przedstawiono sposób określania oddziaływania wybuchu zewnętrznego na przegrody budowlane. W rozważaniach oddziaływania wybuchu zewnętrznego wykorzystano różne procedury znane w literaturze, na podstawie których opracowano stabelaryzowany algorytm postępowania przy wyznaczaniu charakterystyk oddziaływania na przegrody budowlane. Uwzględniono podstawowy podział faz oddziaływania wybuchu na fazę nadciśnienia i podciśnienia. Wyznaczono parametry fali podmuchowej, uwzględniając podział na strefy wybuchu: bliską i daleką. Dla poszczególnych stref przedstawiono sposoby wyznaczania ciśnienia początkowego fali odbitej, czasy trwania nadciśnienia oraz przebieg zmienności obciążenia w czasie.

**Słowa kluczowe:** budownictwo, mechanika konstrukcji, oddziaływania wybuchowe, ładunek punktowy, konstrukcje budowlane

**DOI:** 10.5604/12345865.1157340

### 1. Wstęp

Do najbardziej powszechnych metod wyznaczania obciążeń wybuchowych w sposób analityczny należą metody Bakera [1], Henrycha [13, 14], Bulsona [7], Sadovskiego [22], Sałamachina [23]. Natomiast jedne z nowszych opracowań to metody Cormiego, Smitha, Maysa [8], Husseina [15], Beveridge'a [3], Parisiego i Augentiego [21], Kellihera i Sutton-Swabiego [16], Draganicia i Sigmunda [10], Birnbauma i in. [4], Yina i in. [26].

W polskim piśmiennictwie funkcjonują opisy metod określania obciążeń wybuchowych zawarte m.in. w monografiach Włodarczyka [25], Cudziło i in. [9], podręczniku Krzewińskiego [17] i Urbanowicza [24]. W monografii Włodarczyka

[25] przedstawiono podstawowe równania hydrodynamiki w ujęciu całkowym i różniczkowym wraz z opisem ich właściwości oraz skrócony opis hydrodynamicznej teorii fal detonacyjnych. Charakterystyka oddziaływania ładunku materiału wybuchowego na żelbetowe elementy konstrukcyjne wzmocnione laminatami znajduje się również w pracy Ponety, Stolarskiego i in. [20].

Alternatywnym sposobem wyznaczania obciążeń wybuchowych jest korzystanie z gotowych procedur, np. procedury TM5-1300, opracowanej przez US Department of the Army i zamieszczonej w opracowaniu Bruna i in. [6]. Z kolei najczęściej spotykanym oprogramowaniem do wyznaczania obciążeń wybuchowych jest program Conwep, z którego korzystano m.in. w pracach Lina, Zhanga i Hazella [19] oraz Kellihera i Suttona Swabiego [16]. Innym stosowanym oprogramowaniem tego typu jest np. ATBLAST, Fu [12]. W pracy Birnbauma i in. [4] zamieszczono rozważania dotyczące porównania zmienności w czasie obciążenia od wybuchu określonego według różnych procedur analitycznych oraz z wykorzystaniem oprogramowania. Stwierdzono, że procedury analityczne wykazują dużą zgodność wyników z metodami komputerowymi, co najprawdopodobniej jest skutkiem wykorzystywania tych samych lub podobnych założeń wyjściowych.

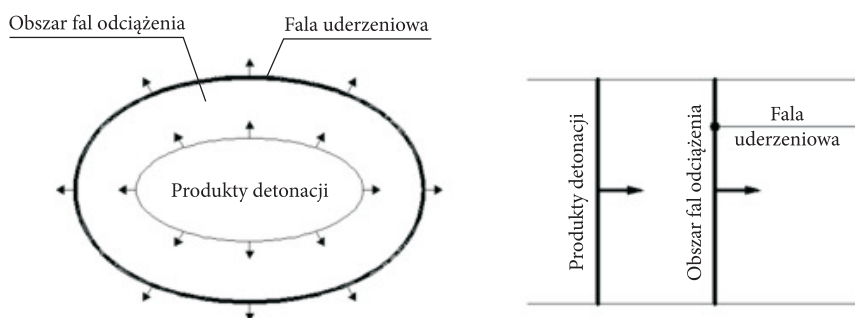
W niniejszej pracy przedstawiono fenomenologiczne ujęcie sposobu wyznaczania obciążenia na przegrody budowlane od wybuchu ładunku materiału wybuchowego zlokalizowanego na zewnątrz konstrukcji. Celem pracy jest opracowanie stabelaryzowanego algorytmu postępowania przy wyznaczaniu charakterystyk oddziaływania wybuchu zewnętrznego uogólnionego na podstawie procedur znanych w literaturze. Podano przykłady obliczania parametrów obciążenia (wartości ciśnienia, zmiany ciśnienia w czasie i czasu trwania obciążenia) od wybuchu ładunku trotylu na typowe konstrukcje przegród budowlanych, z uwzględnieniem proporcji wymiarów geometrycznych konstrukcji. Opracowano przykłady wyznaczania obciążenia wybuchowego na przegrody budowlane, przyjmując założenia upraszczające polegające na: (1) posługiwaniu się formułami aproksymacyjnymi, (2) traktowaniu przegrody budowlanej jako wyodrębnionego obiektu, na który oddziałuje wyłącznie obciążenie od ładunku wybuchowego, (3) pominięciu wpływu oddziaływania fal obciążenia odbitych od przeciwległych lub sąsiednich przegród budowlanych.

## 2. Parametry wybuchu zewnętrznego

### 2.1. Ogólna charakterystyka

Obciążenia zewnętrzne wybuchem na powierzchnie obiektów budowlanych są ściśle związane z wytworzonym podczas procesu detonacji ruchem tzw. produktów detonacji. Ciśnienie podczas wybuchu powstaje w gwałtowny sposób, zwiększając gęstość i temperaturę ośrodka, tworząc fale ciśnienia, które mają charakter fal

uderzeniowych. Fale te oddziałują na otaczający ośrodek, np. powietrzny — w przypadku obiektów naziemnych, gruntowy — w przypadku obiektów podziemnych. Po nagłym wzroście parametrów atmosferycznych następuje rozprężenie związane z coraz większą objętością oddziaływania wybuchu, podczas którego zmniejsza się również temperatura (Cudziło i in. [9], rys. 1).



Rys. 1. Schemat rozprężania się produktów detonacji i ruchu fal ciśnienia

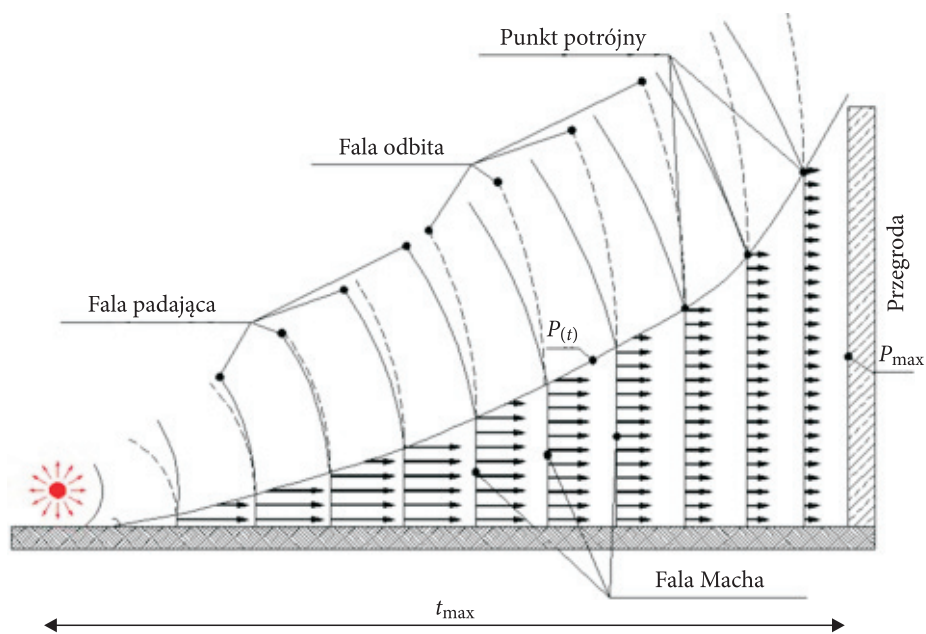
Efektom ruchów cząstek w ośrodku jest powstanie fali odciążenia propagującej się za falą uderzeniową, w której — w odróżnieniu od skokowego charakteru zmian ciśnienia fali uderzeniowej — w sposób płynny zmniejsza się ciśnienie.

Połączone zjawisko gwałtownego zwiększenia ciśnienia fali uderzeniowej oraz płynnego odciążenia nazywany jest falą podmuchową.

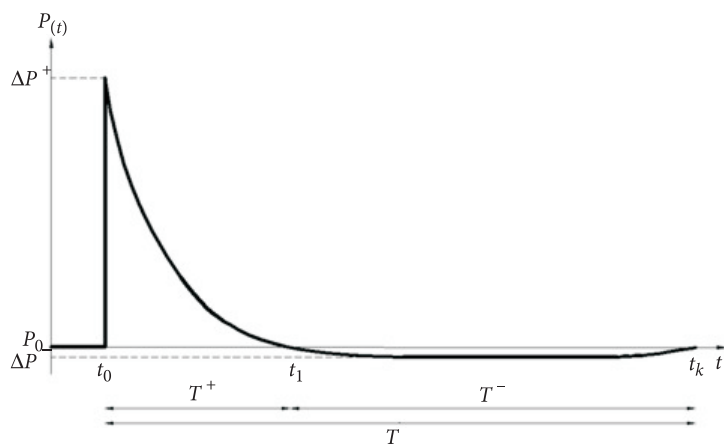
Na rysunku 2 przedstawiono schemat propagacji fali Macha, czyli fali podmuchowej o wygładzonym, równomiernie rozłożonym przebiegu. Fala Macha może zostać zdefiniowana jako wypadkowa fali padającej i odbitej od gruntu o prawie równomiernym rozkładzie. Linia ciągłą przedstawiono falę padającą, linią przerywaną oznaczono falę odbitą od gruntu. Natomiast liniami prostymi oznaczono fale Macha. Punkt potrójny jest punktem, w którym krzyżują się trzy przedstawione fale.

Występują dwa sposoby uwzględnienia oddziaływania wybuchu na przegrodę. Jednym z nich jest określenie impulsu fali podmuchowej, czyli dokładniej jednostkowego popędu fali podmuchowej. Im większy impuls, tym większe obciążenie przejmuje konstrukcja. Alternatywnym sposobem jest określenie funkcji, która opisuje zmiany nadciśnienia w czasie.

Szczegółowy opis oddziaływania fali podmuchowej zawiera podział czasu działania ciśnienia na dwie fazy (rys. 3). Faza pierwsza, czyli oddziaływanie nadciśnienia, charakteryzuje się maksymalnym nadciśnieniem  $\Delta p^+$  ponad ciśnienie atmosferyczne  $p_0$  oraz czasem trwania nadciśnienia  $\tau^+ = t_1 - t_0$ , gdzie  $t_0$  jest czasem dojścia fali nadciśnienia do przegrody, a  $t_1$  jest czasem zaniku nadciśnienia. Faza druga, czyli faza podciśnienia, charakteryzuje się maksymalnym podciśnieniem  $\Delta p^-$  poniżej ciśnienia atmosferycznego  $p_0$  i czasem trwania podciśnienia  $\tau^- = t_k - t_1$ , gdzie  $t_k$  jest czasem zaniku podciśnienia.



Rys. 2. Schemat propagacji fali Macha



Rys. 3. Zmiana ciśnienia w czasie w danym punkcie przestrzeni po dotarciu do niego fali podmuchowej

Efekt podciśnienia w fazie drugiej dla wybuchów ładunków konwencjonalnych w pewnych sytuacjach może być istotny. Pomimo małych wartości podciśnienia, faza ta nie powinna być pomijana ze względu na bardzo długi czas trwania.

## 2.2. Strefy wybuchu

Parametry fali podmuchowej, czyli nadciśnienie na czole fali podmuchowej i czas trwania obciążenia, zależą od masy i położenia ładunku.

W celu opisu podstawowych parametrów fali ciśnienia wprowadzono bezwymiarowe zmienne Sachsa. Pierwszą zmienną jest bezwymiarowa odległość wyrażona zależnością:

$$\lambda = \frac{r}{r_0}, \quad (1)$$

gdzie:  $r$  — odległość ładunku od punktu, w którym obliczamy parametry wybuchu;  
 $r_0$  — promień ładunku.

Drugą zmienną jest bezwymiarowe nadciśnienie odnoszące się do ciśnienia atmosferycznego  $p_0$ :

$$p_s = \frac{\Delta p^+}{p_0}, \quad (2)$$

gdzie:  $\Delta p^+$  — nadciśnienie na czole fali;  
 $p^0$  — ciśnienie początkowe w ośrodku utożsamianym z ciśnieniem atmosferycznym.

Promień ładunku określa się, niezależnie od kształtu ładunku, zgodnie z prawem Sachsa, zwanym prawem podobieństwa lub prawem sześciennego pierwiastka, Cudziło i in. [9]:

$$r_0 = \left( \frac{E}{p_0} \right)^{1/3}, \quad (3)$$

gdzie:  $p_0$  — wartość ciśnienia atmosferycznego;  
 $E = mQ$  — energia wybuchu;  
 $m$  — masa ładunku [kg];  
 $Q$  — ciepło wybuchu [kJ/kg] przyjmowane dla trotylu  $Q = 3680$  [kJ/kg].

W literaturze spotkać możemy również inną wartość ciepła wybuchu dla trotylu  $Q = 4200$  [kJ/kg] [9].

W przypadku zastosowania ładunku MW na sztywnym podłożu masę ładunku należy pomnożyć przez współczynnik zawierający się w przedziale  $\alpha_p = (1,4; 2,0)$ :

$$m_p = a_p \cdot m. \quad (4)$$

Jest to spowodowane zmianą energii wywołaną wytworzeniem leja powybuchowego. Wartości  $\alpha_p$  mogą różnić się nieznacznie w różnych źródłach literatury, Krzewiński [17]. Dla podłoża betonowego (lub skalistego) przyjmujemy wartość współczynnika zwiększającego  $\alpha_p = 2,0$ .

Przeprowadzając obliczenia w strefie dalekiej w przypadku materiałów wybuchowych innych niż TNT, zgodnie z prawem Sachsa możemy posłużyć się równoważnikiem trotylowym:

$$a_T = \frac{m_T}{m_i} = \frac{Q_T}{Q_i}, \quad (5)$$

gdzie:  $m_T$  — masa TNT;

$Q_T$  — ciepło właściwe wybuchu TNT;

$m_i$  i  $Q_i$  — masa i ciepło właściwe wybuchu dowolnego materiału wybuchowego.

Równoważnik trotylowy (5) wyraża liczbowo masę trotylu, która spowoduje powstanie fali podmuchowej o takich samych parametrach jak fala wywołana przez masę 1 kg innego materiału wybuchowego.

Promień zastępczego ładunku kulistego przedstawia zależność określona przy założeniu gęstości ładunku  $\rho_0$ :

$$r_0 = \sqrt[3]{\frac{3m}{4\pi\rho_0}}. \quad (6)$$

Wartość obciążenia na powierzchnię konstrukcji zależy od odległości ładunku wybuchowego od obiektu. Podział stref wybuchu uzależniony jest od wartości parametru pomocniczego  $\lambda_t$  określonego zależnością:

$$\lambda_t = \frac{r}{\sqrt[3]{m}} = \left(\frac{Q}{p_0}\right)^{1/3} \lambda. \quad (7)$$

Na podstawie parametru  $\lambda_t$  wg (7) możliwe jest dokonanie podziału na dwie strefy wybuchu:

$$\lambda_t \leq 1 \text{ — strefa bliska, } \lambda_t > 1 \text{ — strefa daleka,} \quad (8)$$

w których w zróżnicowany sposób określa się parametry wybuchu, Cudziło i in. [9].

### 2.3. Nacisnienie fali podmuchowej w strefie bliskiej

Bezwymiarowe nacisnienie na czole fali podmuchowej jest określone następująco, Cudziło i in. [9], Henrych [13, 14]:

dla  $\lambda_t \in (0,05; 0,3)$

$$p_s = 14,07\lambda_t^{-1} + 5,54\lambda_t^{-2} - 0,3572\lambda_t^{-3} + 0,00625\lambda_t^{-4}, \quad (9)$$

dla  $\lambda_t \in (0,3; 1)$

$$p_s = 6,194\lambda_t^{-1} - 0,326\lambda_t^{-2} + 2,1324\lambda_t^{-3}. \quad (10)$$

### 2.4. Nacisnienie fali podmuchowej w strefie dalekiej

Bezwymiarowe nacisnienie dla strefy dalekiej możemy określać, korzystając ze wzorów Sadowskiego [22] dla  $\lambda_t \in [1, 10]$  lub wzorów asymptotycznych Bakera i in. [1] dla  $\lambda_t > 10$ .

Wzory Sadowskiego [26] są najczęściej używanymi wzorami aproksymującymi wyniki eksperymentalne i przedstawiane są w postaci trzech równoważnych zapisów:

$$p_s = 0,754\lambda_t^{-1} + 2,457\lambda_t^{-2} + 6,5\lambda_t^{-3} \quad (11)$$

lub

$$p_s = 0,229\lambda^{-1} + 0,227\lambda^{-2} + 0,182\lambda^{-3}, \quad (12)$$

lub

$$p_s = 0,84A + 2,7A^2 + 7A^3, \quad (13)$$

gdzie:

$$A = \frac{\sqrt[3]{m}}{r}.$$

Zależności określone wzorami Sadowskiego (12) i (13) zostały wyprowadzone przy zastosowaniu prawa Sachsa oraz wartości ciepła wybuchu dla trotylu  $Q = 3680$  kJ/kg.

Wzory asymptotyczne Bakera i Coxa wyrażone są w postaci różnych funkcji aproksymujących:

$$p_{s,1} = A_1\lambda^{-1}, p_{s,2} = A_2\lambda^{-1}(\ln\lambda)^{-1/2}, p_{s,3} = A_3\lambda^{-4/3}, \quad (14)$$

w których współczynniki skalujące  $A_1, A_2, A_3$  wyznacza się, przyrównując wartość nacisnienia wg zależności (12) i (14) przy ustalonej wartości  $\lambda = 3$ .

Wartości nacisnienia  $p_{s,i}$  określa się, podstawiając wyznaczone współczynniki  $A_i$  oraz rzeczywiste wartości  $\lambda$  do zależności (14).

## 2.5. Zmienność ciśnienia w czasie

Po wyznaczeniu bezwymiarowych wartości nadciśnienia  $p_s$  można określić maksymalne nadciśnienie na podstawie drugiej zmiennej Sachsa:

$$\Delta p^+ = p_0 \cdot p_s. \quad (15)$$

Czas trwania fazy nadciśnienia w strefie bliskiej i w strefie dalekiej określa się wg zależności, Krzewiński [17]:

$$\tau^+ = \begin{cases} 9 \frac{r_0}{a_0} & \text{dla } \lambda < 25 \\ 1,8 \frac{r_0}{a_0} \sqrt{\lambda} & \text{dla } 25 \leq \lambda \leq 150 \\ 4,2 \frac{r_0}{a_0} \sqrt[3]{\lambda} & \text{dla } \lambda > 150, \end{cases} \quad (16)$$

gdzie:  $a_0$  — prędkość rozchodzenia się dźwięku w ośrodku.

Alternatywnie czas trwania impulsu nadciśnienia można określić na podstawie wzoru Sadowskiego, Cudziło i in. [9] dla  $\lambda_t \in (1,15)$ :

$$\tau^+ = 1,5 \lambda_t^{1/2} \cdot m^{1/3}. \quad (17)$$

Maksymalne podciśnienie oraz czas trwania fazy podciśnienia wyznaczamy na podstawie zależności, Krzewiński [17]:

$$\Delta p^- = 5,6 \cdot p_0 \cdot \frac{r_0}{r}, \quad (18)$$

$$\tau^- = 80 \frac{r_0}{a_0}. \quad (19)$$

Nadciśnienie na czole fali odbitej na powierzchni przegrody budowlanej  $\Delta p_{od}$  można określić na podstawie zależności, Krzewiński [17], Beveridge i in. [3], Bulson [7]:

$$\Delta p_{od} = 2\Delta p^+ + \frac{6\Delta p^{+2}}{\Delta p^+ + 7p_0}. \quad (20)$$

Zmienność ciśnienia w czasie  $\Delta p(t)$  określa się identycznie zarówno w strefie bliskiej, jak i dalekiej na podstawie zależności znanych w literaturze. W tym celu najczęściej stosowane są zależności opracowane przez Lee i Chiu [18], Brode'a [5], Friedlandera [11] lub Krzewińskiego [17].



Funkcja zmiany nadciśnienia w czasie według Lee i Chiu [18] jest zapisana w postaci:

$$\Delta p(t) = \Delta p_{od} \left(1 - \frac{t}{\tau^+}\right) e^{\left(\frac{at}{\tau^+}\right)}, \quad (21)$$

gdzie:  $a = 1,39\Delta p^{+0,54}$ .

Natomiast funkcja zmiany nadciśnienia w czasie według Brode'a [5] ma postać:

$$\Delta p(t) = \Delta p_{od} \left(1 - \frac{t}{\tau^+}\right) e^{\left(\frac{at}{\tau^+}\right)}, \quad (22)$$

gdzie:

$$a = \begin{cases} 0,5 + \Delta p^+ & \text{dla } \Delta p^+ \leq 1 \\ 0,5 + \Delta p^+ \left[1,1 - (0,13 + 0,2\Delta p^+) \left(t / \tau^+\right)\right] & \text{dla } \Delta p^+ \in [1, 3]. \end{cases}$$

Z kolei funkcja zmiany nadciśnienia w czasie według Friedlandera [11] określona jest na podstawie zależności:

$$\Delta p(t) = \Delta p_{od} \left(1 - \frac{t}{\tau^+}\right) e^{\left(\frac{-t}{\tau^+}\right)}. \quad (23)$$

Funkcja zmiany nadciśnienia w czasie według Krzewińskiego [17] ma postać:

$$\Delta p(t) = \Delta p_{od} \left(1 - \frac{t}{\tau^+}\right)^n, \quad (24)$$

gdzie:  $n = 1,9 \sqrt{\frac{\Delta p_{od}}{p_0}}$ .

### 3. Algorytm wyznaczania przebiegu zmienności w czasie wybuchu od ładunku zewnętrznego

Na podstawie rozważań dotyczących oddziaływania wybuchu zewnętrznego na konstrukcje obiektów budowlanych, w tabeli 1 przedstawiono sposób wyznaczania parametrów obciążenia wybuchowego.

TABELA 1

Algorytm wyznaczania obciążenia wybuchowego przy detonacji ładunku zewnętrznego

Lp.	Etap procedury	Oznaczenie parametru	Formuła określająca parametr
1	Przyjąć masę ładunku	$m$	
2	Wyznaczyć zastępczy promień ładunku	$r_0$	(3), (6)
3	Wyznaczyć parametr pomocniczy do określenia strefy oddziaływania	$\lambda_t$	(7)
4	Wyznaczyć bezwymiarowe nadciśnienie w zależności	$p_s$	$\lambda_t < 0,05$ ładunek kontaktowy $\lambda_t \in (0,05-0,3)$ (9) $\lambda_t \in (0,3-1)$ (10) $\lambda_t \in (1-10)$ (11), (12), (13) $\lambda_t > 10$ (14)
5	Wyznaczyć przyrost nadciśnienia (nadciśnienie na czole fali)	$\Delta p^+$	(15)
6	Wyznaczyć nadciśnienie na czole fali odbitej	$\Delta p_{od}$	(20)
7	Wyznaczyć czas trwania fazy nadciśnienia	$\tau^+$	(16), (17)
8	Wyznaczyć przyrost podciśnienia	$\Delta p^-$	(18)
9	Wyznaczyć czas trwania fazy podciśnienia	$\tau^-$	(19)
10	Wyznaczyć funkcję zmienności w czasie	$\Delta p(t)$	(21), (22), (23), (24)

#### 4. Analiza obciążenia od detonacji ładunku zewnętrznego

Analizę obciążenia od detonacji ładunku zewnętrznego przeprowadzono dla warunków niezaburzonej atmosfery standardowej, zwanej również międzynarodową atmosferą standardową (MAS), Krzewiński [17], Cudziło i in. [9], lub międzynarodową atmosferą wzorcową (MAW), albo International Standard Atmosphere (ISA) według Batchelora [2].

Analizę przeprowadzono dla charakterystycznych parametrów atmosfery MAS:

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

$$\rho_1 = 1,227 \text{ kg/m}^3,$$

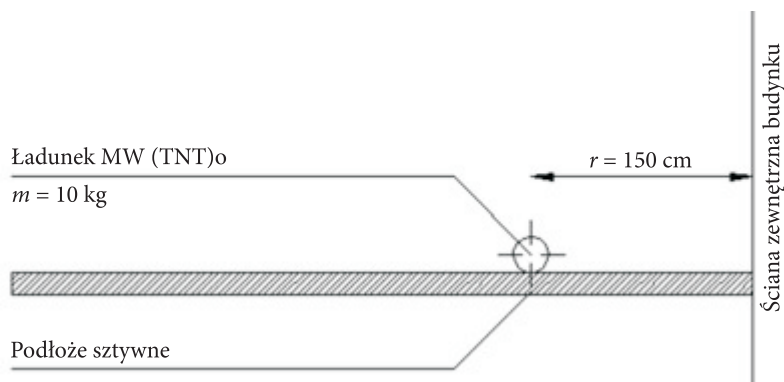
$$T = 288 \text{ K},$$

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

Obliczenia przeprowadzono przy następujących założeniach:

- kształt ładunku: kulisty,
- odległość od obiektu:  $r = 1,5$  m,
- rodzaj obiektu: sztywna (nieodkształcalna) przegroda budowlana,
- podłoże: sztywne,
- rodzaj ładunku: TNT,
- gęstość ładunku:  $\rho_0 = 1560$  kg/m<sup>3</sup>,
- masa ładunku:  $m = 10$  kg.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat lokalizacji ładunku materiału wybuchowego względem obiektu.

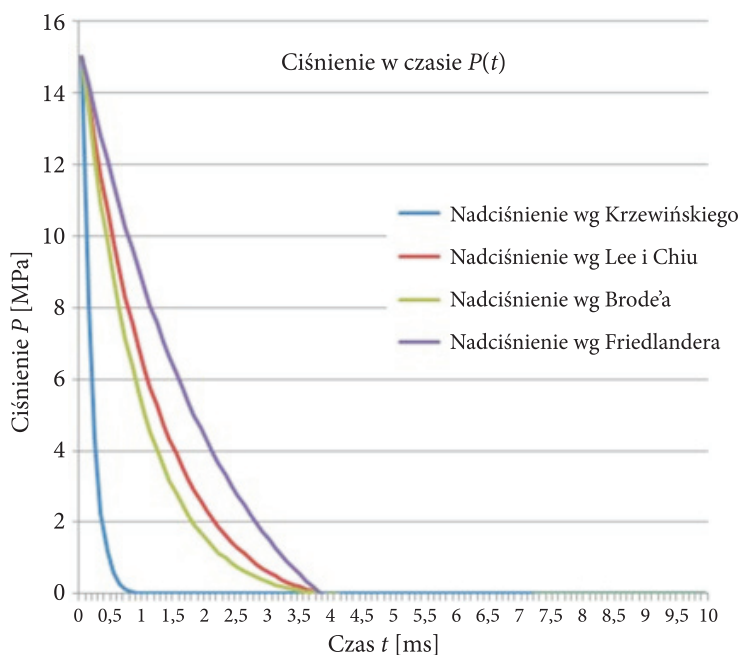
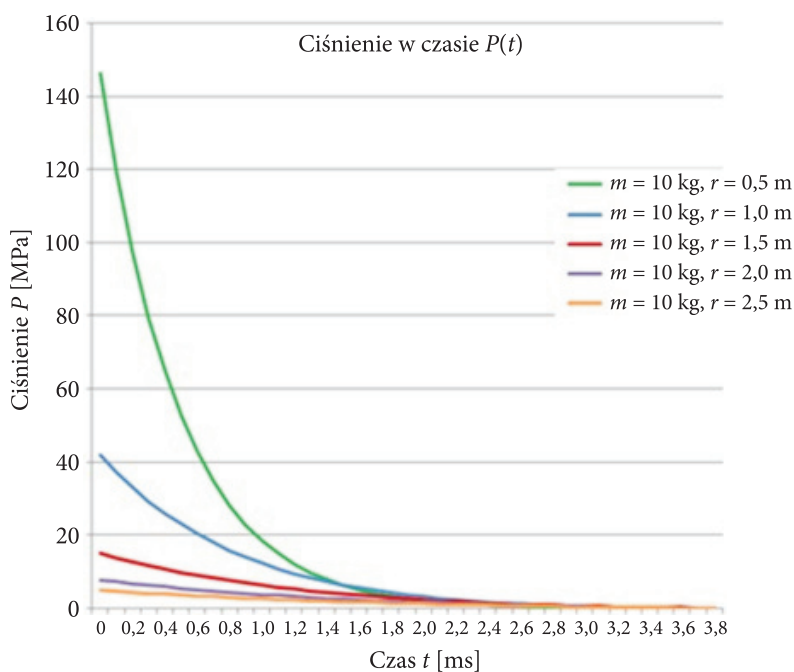


Rys. 4. Schemat rozmieszczenia ładunku materiału wybuchowego (MW)

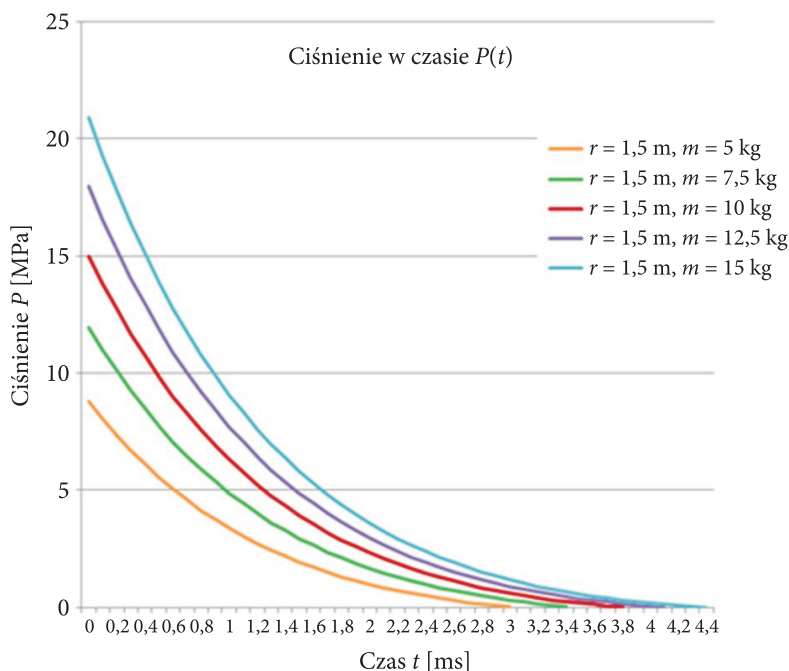
Dla przedstawionych założeń podłoża sztywnego, aby uzyskać wyniki obliczeń fali podmuchowej w porównaniu dla warunków nieograniczonej przestrzeni powietrznej z warunkami ładunku umieszczonego na płycie o średnicy  $d > 10 r_0$ , obliczeniowo masę ładunku należy skorygować wg (4) z uwzględnieniem współczynnika zwiększającego  $\alpha_p = 2,0$ . Obliczeniową masę materiału ładunku wybuchowego przyjęto zatem  $m_p = 20$  kg.

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki zmiany nadciśnienia w czasie powstałe w wyniku wybuchu ładunku materiału wybuchowego dla przyjętych założeń. Obserwuje się dużą rozbieżność wyników otrzymanych wg poszczególnych metod. Na podstawie pracy Cudziło i in. [9] zaleca się stosowanie podejścia wg Lee i Chiu, które w dalszej części pracy zostało przyjęte jako miarodajne.

Z kolei na rysunku 6 przedstawiono przebieg zmiany nadciśnienia w czasie przy założeniu zmian jednego parametru, tj. odległości ( $r$ ) ładunku od obiektu przy ustalonej masie ładunku  $m = 10$  kg. Przebieg wyznaczono na podstawie zależności Lee i Chiu. We wszystkich przypadkach obciążenia uzyskuje się ten sam czas trwania fazy nadciśnienia równy  $t_1 = 3,48$  ms. Jest to spowodowane występowaniem strefy bliskiej we wszystkich rozważanych wariantach. Zauważamy, że zwiększenie odległości ładunku od przegrody powoduje mniejsze różnice między wartościami nadciśnienia.

Rys. 5. Przebieg nadciśnienia w czasie ( $r = 1,5$  m,  $m = 10$  kg TNT)Rys. 6. Przebieg nadciśnienia w czasie w zależności od zmiany odległości ( $r$ ) ładunku od elementu

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg zmiany nadciśnienia w czasie przy założeniu zmian masy ładunku materiału wybuchowego ( $m$ ) przy ustalonej odległości  $r = 1,5$  m. Przebieg wyznaczono również na podstawie zależności Lee i Chiu.



Rys. 7. Przebieg nadciśnienia w czasie w zależności od zmiany masy ładunku ( $m$ )

Zauważyć możemy, że w przypadku zmiany masy ładunku przy stałej odległości różnica w wartości maksymalnego nadciśnienia odbitego jest proporcjonalnie prawie jednakowa dla każdej zmiany ładunku.

W przypadku rozpatrywania zmiany masy w porównaniu ze zmianą odległości ładunku od obiektu różnice nadciśnienia osiągają mniejsze wartości, ale nadal są znaczące.

W tabeli 2 zestawiono otrzymane wyniki czasu trwania nadciśnienia i maksymalnej wartości nadciśnienia w zależności od zmiany masy ładunku oraz zmiany odległości od elementu. Jako wartości porównawcze przyjęto wyniki dla ustalonych założeń podstawowych odpowiednio  $m = 10$  kg lub  $r = 1,5$  m.

TABELA 2

Zależność czasu trwania nadciśnienia i nadciśnienia fali odbitej od masy ładunku i odległości od obiektu dla oddziaływania zewnętrznego

Odległość $r$ [m]	Masa ładunku $m$ [kg]	Czas trwania nadciśnienia [ms]	Różnica czasu [%]	Nadciśnienie fali odbitej [MPa]	Różnica nadciśnienia [%]
0,5	10	3,84	0	146,3	+875
1,0				41,9	+179
1,5				15,0	0
2,0				7,8	-48
2,5				4,9	-67
1,5	5	3,05	-21	8,8	-41
	7,5	3,49	-9	12,0	-20
	10	3,84	0	15,0	0
	12,5	4,14	+8	18,0	+20
	15	4,40	+15	20,9	+39

## 5. Rozkład ciśnienia wybuchu na powierzchni przegrody

W celu uwzględnienia rozkładu gazów powybuchowych na wysokości i szerokości przegrody należy zmodyfikować zależności do wyznaczania zmienności w czasie ciśnienia gazów powybuchowych poprzez uwzględnienie zmiennych kątów padania fali na przegrodę, Poneta, Stolarski i in. [20]:

$$\Delta p_{od}^{VH} = \Delta p_{od} \cdot \cos^2 \alpha_V \cdot \cos^2 \alpha_H, \quad (25)$$

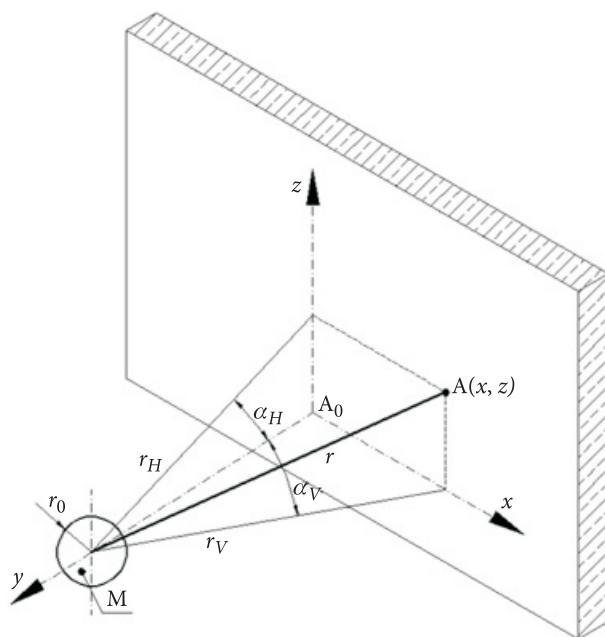
gdzie:  $\Delta p_{od}^{VH}$  — nadciśnienie na czole fali odbitej w odległości  $x$  w kierunku poziomym i na wysokości  $z$  w kierunku pionowym od punktu przecięcia osi normalnej z przegrodą wg rysunku 8;

$\Delta p_{od}$  podstawowa wartość nadciśnienia na czole fali odbitej określona wg zależności (20);

$\alpha_V = \arctg \frac{x}{y}$ ,  $\alpha_H = \arctg \frac{z}{y}$  — odpowiednie kąty padania fali

wg rysunku 8.

Przeprowadzono analizę rozkładu zmiennego w czasie nadciśnienia na powierzchni sztywnej przegrody, wywołanego wybuchem ładunku materiału wybuchowego umieszczonego centralnie w połowie szerokości przegrody, na poziomie podstawy przegrody. W celu określenia wartości nadciśnienia powierzchnię obiektu podzielono na jednakowe kwadratowe sektory o wymiarach boków równych



Rys. 8. Schemat usytuowania ładunku względem dowolnego punktu na powierzchni przegrody

1/5 wysokości przegrody (rys. 9). Dla każdego z sektorów wyznaczono wykres zmienności nadciśnienia w czasie, przyjmując, jako miarodajną, najmniejszą odległość  $r_i$  w każdym sektorze.

Obliczenia przeprowadzono przy następujących założeniach:

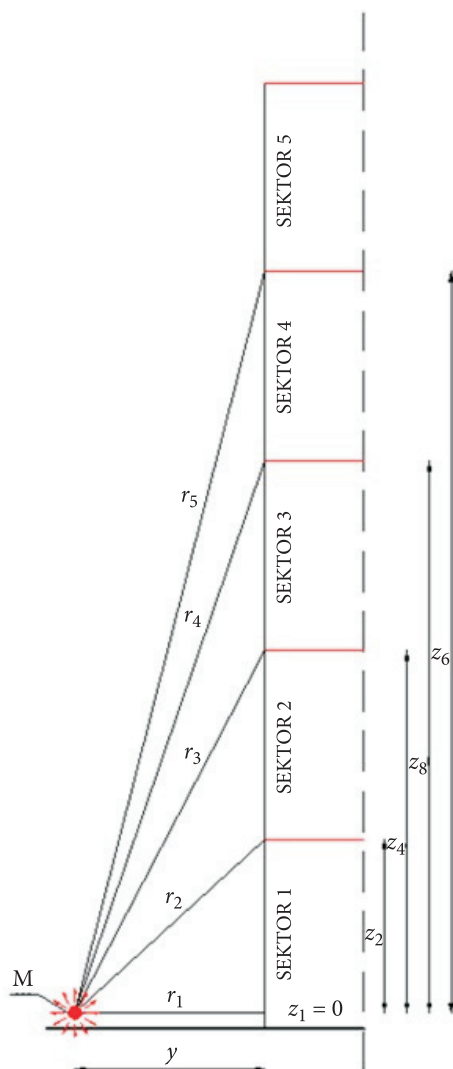
- kształt ładunku: kulisty,
- odległość ładunku od obiektu:  $r = 3,0$  m,
- rodzaj przegrody: nieodkształcalna ściana zewnętrzna budynku o wysokości 15 m i szerokości 30 m,
- podłóże: sztywne,
- rodzaj ładunku: TNT,
- gęstość ładunku:  $\rho_0 = 1560$  kg/m<sup>3</sup>,
- masa ładunku:  $m = 20$  kg.

W obliczeniach uwzględniono parametry atmosfery standardowej MAS.

Na podstawie założonych danych parametrów geometrycznych i fizycznych ładunku, odległości ładunku od przegrody oraz parametrów geometrycznych obiektu przeprowadzono analizę rozkładu nadciśnienia w czasie dla poszczególnych sektorów wysokości przegrody, w pionowej osi symetrii, tj. dla kąta  $\alpha_v = 0^\circ$  w zależności (25), (rys. 10-14).

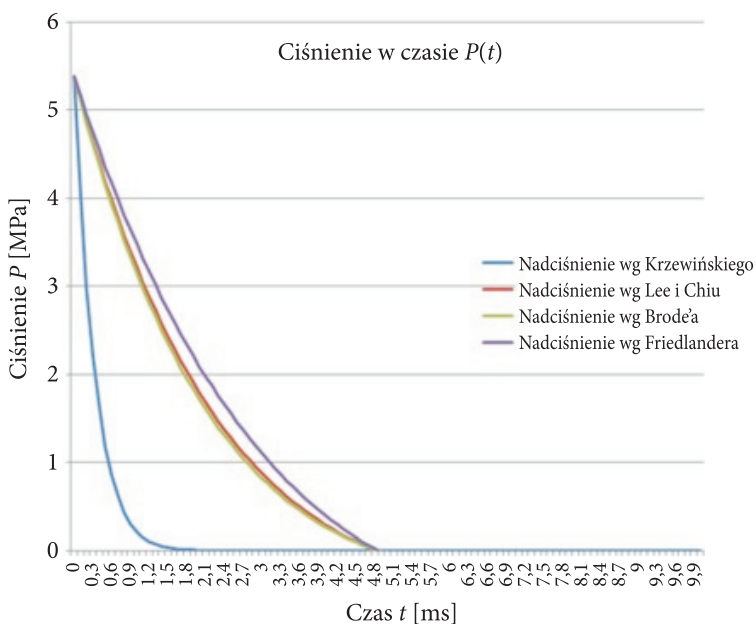
W sektorach 1 i 2 stwierdzono gwałtowny wzrost nadciśnienia początkowego w stosunku do ciśnienia atmosferycznego (rys. 10 i 11). Natomiast w sektorze

3, 4 i 5 zauważono mniejszy wzrost nadciśnienia początkowego w stosunku do ciśnienia atmosferycznego (rys. 12-14). Zauważono również, że czas trwania obciążenia w sektorze 1 i 2 jest taki sam, natomiast w sektorach 3, 4 i 5 stwierdzono jego zwiększenie.

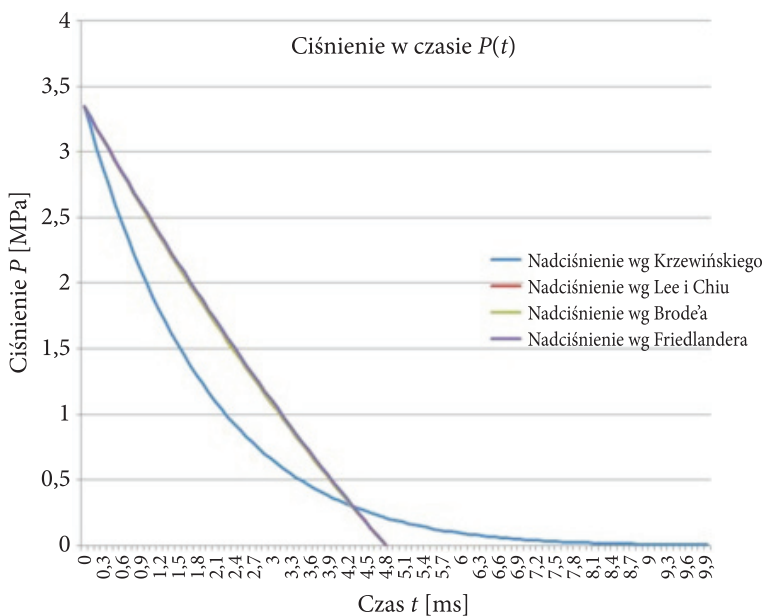


Rys. 9. Podział wysokości budynku na sektory i usytuowanie ładunku wybuchowego

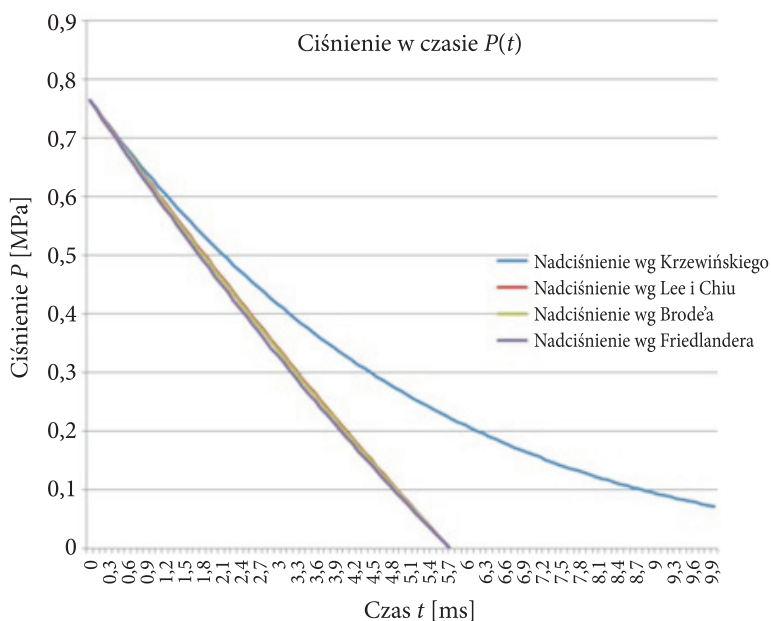




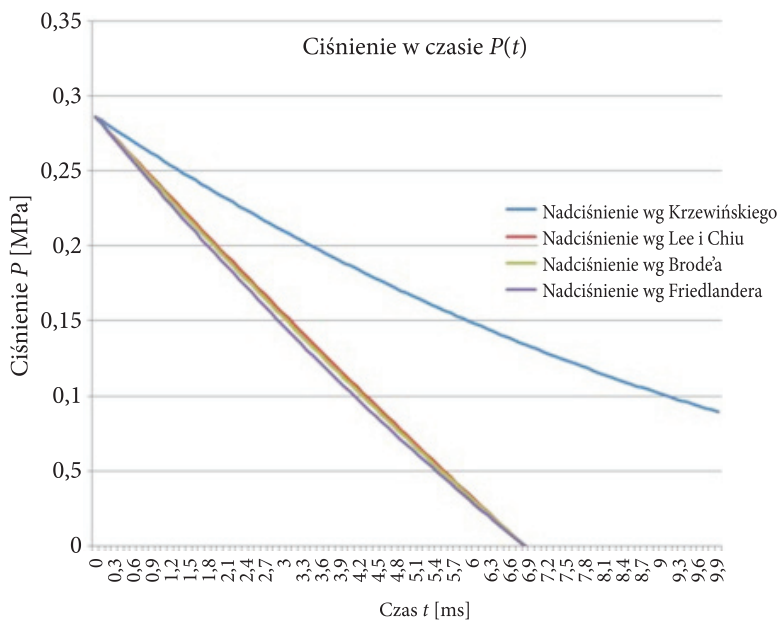
Rys. 10. Zmiana nadciśnienia w czasie dla sektora 1 w pionowej osi symetrii



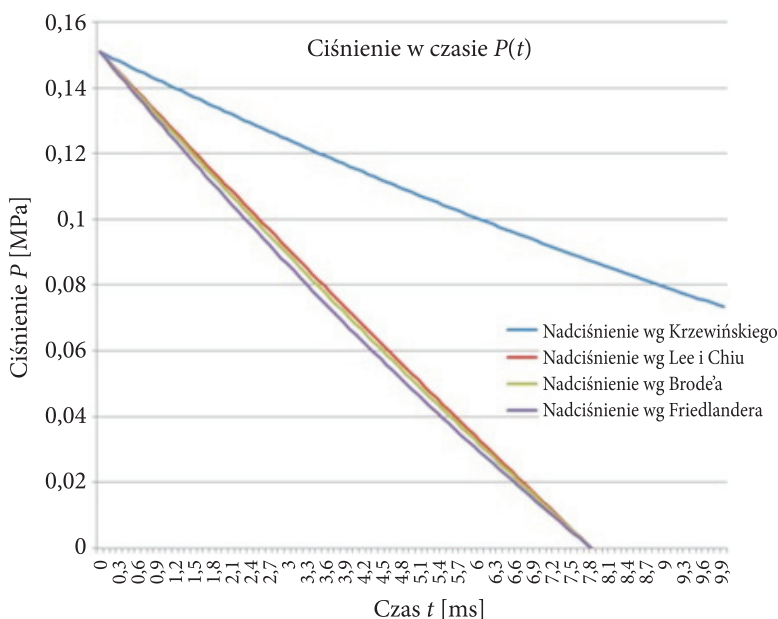
Rys. 11. Zmiana nadciśnienia w czasie dla sektora 2 w pionowej osi symetrii



Rys. 12. Zmiana nadciśnienia w czasie dla sektora 3 w pionowej osi symetrii



Rys. 13. Zmiana nadciśnienia w czasie dla sektora 4 w pionowej osi symetrii



Rys. 14. Zmiana nadciśnienia w czasie dla sektora 5 w pionowej osi symetrii

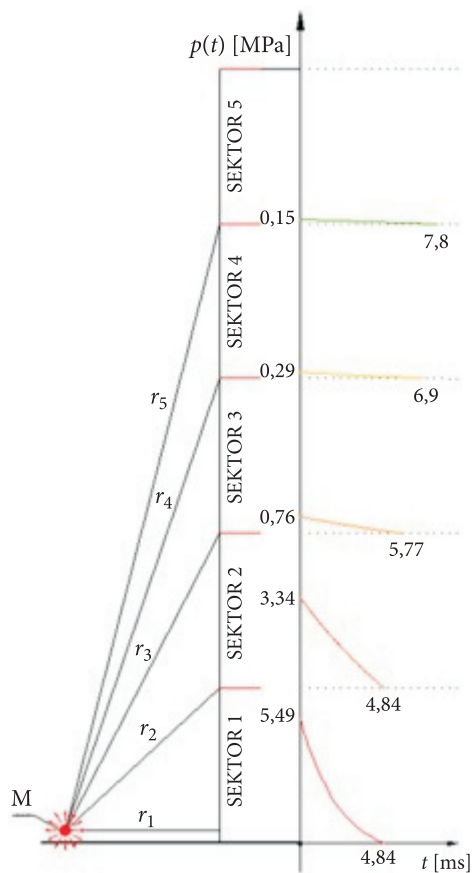
Na wykresach można zauważyć bardzo dobrą zgodność zależności opisującej zmianę nadciśnienia w czasie określoną wg trzech formuł Lee i Chiu, Brode'a oraz Friedlandera, od których znacznie odbiegają wyniki określone wg formuły Krzewińskiego.

Zestawienie zmian ciśnienia w czasie określone wg podejścia Lee i Chiu (21) przedstawiono na rysunku 15 dla poszczególnych sektorów centralnych na wysokości budynku. Na wykresie kolorem bordowym oznaczono zmianę ciśnienia w sektorze 1, kolorem czerwonym w sektorze 2, kolorem pomarańczowym w sektorze 3, kolorem żółtym w sektorze 4, a kolorem zielonym w sektorze 5.

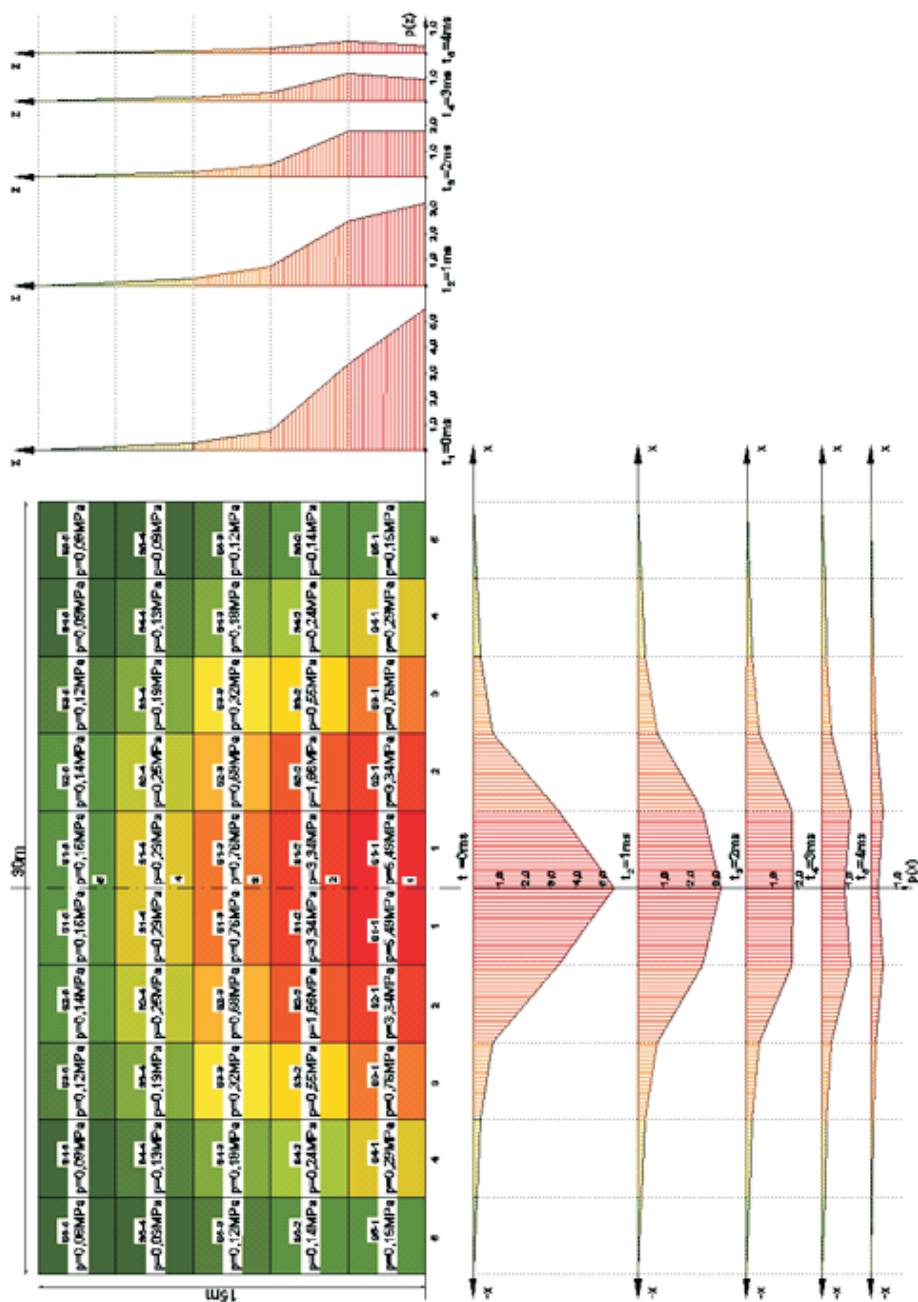
W analogiczny sposób przedstawiono wyniki na powierzchni, zgodnie z założonym podziałem przegrody na sektory. Wyniki określono na podstawie podejścia Lee i Chiu (21), z wykorzystaniem zależności (25).

Na rysunkach 16 i 17 zaprezentowano zmianę wartości ciśnienia szczytowego na szerokości budynku (wzdłuż osi  $x$ ) oraz na wysokości budynku (wzdłuż osi  $z$ ), w wybranych chwilach  $t_1 = 0$  ms,  $t_2 = 1$  ms,  $t_3 = 2$  ms,  $t_4 = 3$  ms i  $t_5 = 4$  ms czasu trwania obciążenia. Poszczególne wykresy obciążeń i strefy oddziaływania tych obciążeń oznaczono kolorami w sposób analogiczny jak na rysunku 15.

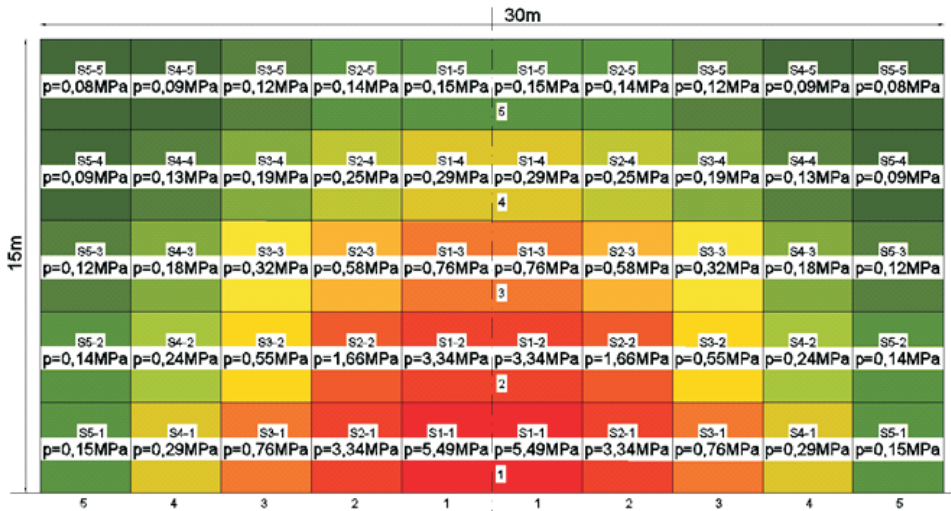
Obserwuje się, że w trakcie trwania obciążenia na wykresie wzdłuż osi  $z$  zmiany wartości ciśnienia szczytowego w sektorze 1 następuje gwałtowny spadek wartości pomiędzy czasem  $t_1$  i  $t_2$ . W czasie  $t_3$  spadek ciśnienia w stosunku do ciśnienia szczytowego równego 5,49 MPa wynosi ok. 68%. Na kierunku  $x$  przeprowadzono analogiczną analizę zmiany wartości ciśnienia w poszczególnych strefach.



Rys. 15. Rozkład ciśnienia w czasie w poszczególnych sektorach wysokości przegrody



Rys. 16. Wykres rozkładu ciśnienia w poszczególnych sektorach budynku w chwilach czasowych  $t_0-t_5$



Rys. 17. Wykres rozkładu ciśnienia w poszczególnych sektorach budynku w chwilach czasowych  $t_0-t_5$

## 6. Zakończenie

W wyniku przeprowadzonej analizy formuł dotyczących wyznaczania oddziaływań wybuchowych różnych autorów, opracowano stabelaryzowany algorytm umożliwiający określanie podstawowych parametrów fal podmuchowych. Zaproponowano fenomenologiczne podejście określające zmianę ciśnienia w czasie działającego na powierzchni przegrody. Przedstawiono wyniki analizy wpływu zmian parametrów ładunku wybuchowego na zmienność obciążenia w czasie. Zaprezentowano przykład wyznaczenia zmienności ciśnienia w czasie w sektorach powierzchni sztywnej przegrody budowlanej na podstawie formuły Lee i Chiu. Wyboru formuły dokonano na podstawie analizy ograniczeń zależności opisujących zmienności ciśnienia w czasie. Zależność Krzewińskiego ograniczona jest zasadniczo do fazy nadciśnienia. Natomiast pozostałe formuły umożliwiają wyznaczenie zmienności w czasie dla całego czasu trwania obciążenia, uwzględniając fazę podciśnienia. Formuły Lee i Chiu oraz Brode'a są uszczegółowionymi zależnościami wzoru Friedlandera. Różnica pomiędzy zależnościami Lee i Chiu oraz Brode'a wynika z odmiennego ujęcia wartości współczynnika pomocniczego  $a$ , który w zapisie zależności (22) wg Cudziło [9] ogranicza zastosowanie wzoru Brode'a do wartości maksymalnego nadciśnienia równego 3 MPa.

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

Artykuł wpłynął do redakcji 21.11.2014 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 19.01.2015 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] BATCHELOR G.K., *An introduction to fluid dynamic*, University Press, Cambridge, Massachusetts, 1967.
- [3] BEVERIDGE A. i in., *Forensic investigation of explosions*, CRC Press, Boca Raton–London–New York, 2012.
- [4] BIRNBAUM N., CLEGG R., FAIRLIE G.E., HAYHURST C.J., FRANCIS N.J., *Analysis of blast loads on buildings*, Century Dynamics Incorporated & Century Dynamics Limited, Oakland and England, 2012.
- [5] BRODE L.H., *Blast wave from a spherical charge*, Phys. Fluids, 2, 1959.
- [6] BRUN M., BATTI A., LIMAM A., GRAVOUIL A., *Explicit/implicite multi-time step co-computations for blast analyses on a reinforced concreto frame structure*, Finite Elements in Analysis and Design 52, 2011, 41-59.
- [7] BULSON P.S., *Explosive loading of engineering structures*, Taylor & Francis, London and New York, 1997.
- [8] CORMIE D., SMITH P., MAYS G., *Blast effect on buildings*, Cranfield University at the Defence Academy of the United Kingdom, London, 2009.
- [9] CUDZIŁO S., MARANDA A., NOWACZEWSKI J., TRĘBIŃSKI R., TRZCIŃSKI W.A., *Wojskowe materiały wybuchowe*, Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej, Częstochowa, 2000.
- [10] DRAGANIĆ H., SIGMUND V., *Blast loading on structures*, Technički Vjesnik, Croatia, 2012.
- [11] FRIEDLANDER F.G., *The diffraction of sound pulses*, I. *Diffraction by a semifinite plane*, Proc. Rog. Soc., A186, London, 1941.
- [12] FU F., *Dynamic response and robustness of tall buildings under blast loading*, Journal of Constructional Steel Research, 80, 2012, 299-307.
- [13] HENRYCH J., *The dynamics of explosion and its use*, Elsevier, New York, 1979.
- [14] HENRYCH J., *The dynamics of explosion*, Academia, Prague, 1979.
- [15] HUSSEIN A.T., *Non-linear analysis of SDOF system under blast load*, European Journal of Scientific Research, vol. 45, no. 3, 2010, 430-437.
- [16] KELLIHER D., SUTTON-SWABY K., *Stochastic representation of blast load damage in a reinforced concreto building*, Structural Safety, 34, 2011, 407-417.
- [17] KRZEWIŃSKI R., *Dynamika wybuchu*, Część I. *Metody określania obciążeń*, WAT, Warszawa, 1983, Część II. *Działanie wybuchu w ośrodkach inercyjnych*, WAT, Warszawa, 1982.
- [18] LEE J.H.S., *Physics of explosion*, McGill University, Montreal, 1984.
- [19] LIN X., ZHANG Y.X., HAZELL P.J., *Modelling the response of reinforced concreto panels under blast loading*, Materials and Design 56, 2014, 620-628.
- [20] PONETA P., GILUŃ A., JURCZUK J., ŚWIEŻEWSKI P., STOLARSKI A., BĄK G., BŁAŻEJEWICZ T., KRZEWIŃSKI R., ONOPIUK S., REKUCKI R., SZCZEŚNIAK Z., *Badania elementów żelbetowych*

wzmocnionych laminatami obciążonych wybuchowo, Część I. Opis programu badań i badania materiałów konstrukcyjnych, Biul. WAT, 60, 4, 2011, 41-77.

- [21] PARISI F., AUGENTI N., *Influence of seismic design criteria on blast resistance of RC framed buildings: A case study*, Engineering Structures, 44, 78-93; SACHS R.G., *The dependence of blast on ambient pressure and temperature*, BRL Report 466, Aberdeen Proving Ground, Maryland, 2012.
- [22] SADOVSKIY M.A., *Mekhanichskoe dejstvie vozduzhnykh udarnykh voln vzryva po dannym eksperimentalnykh issledovaniji*, Fizika Vzryva, 1, 1952.
- [23] SAŁAMACHIN T., *Fizyczskie osnowy mechaniczskowo dejstwija wzrywa i metody predielenia wzrywnykh nagruzok*, WIA, Moskwa, 1974.
- [24] URBANOWICZ G., *Obciążenia wyjątkowe — wybuch mieszanin gazowo-powietrznych*, II Krajowa Konferencja Naukowo-Techniczna: Problemy Badawcze i Techniczne Związane z Projektowaniem, Wykonawstwem i Eksploatacją Budowli Obronnych i Ochronnych, Gdynia, 1997, 125-129.
- [25] WŁODARCZYK E., *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa, 1994.
- [26] YIN X., GU X., LIN F., KUANG X., *Numerical analysis of blast loads inside buildings*, Computational Structural Engineering, 2009, 681-690.

J. SIWIŃSKI, A. STOLARSKI

#### **Analysis of the external explosion action on the building barriers**

**Abstract.** The paper presents a method for determination of the action of an external explosion on building barriers. We used different procedures, known in the literature, for analysis of action of an external explosion. These procedures were the basis of tabulated algorithm for determination of the characteristics of the explosion action on the building barriers. We considered the basic division of phases of explosion action onto overpressure phase and underpressure phase. We determined blast wave parameters considering the division of explosion zone onto the close zone and distant zone. For each zone, we presented the methods of determination of the initial pressure of the reflected wave, time durations of overpressure phase, and the load variation in time.

**Keywords:** civil engineering, structural mechanics, explosive actions, building structures