



## Przegląd metod obliczania parametrów fal podmuchowych

Waldemar A. TRZCIŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Nowych Technologii i Chemii,  
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
\* autor korespondencyjny, e-mail: waldemar.trzcinski@wat.edu.pl

Artykuł wpłynął do redakcji 19.03.2015. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano 13.04.2015

DOI 10.5604/20815891.1195201

**Streszczenie.** W pracy dokonano przeglądu najczęściej stosowanych metod obliczania parametrów fal podmuchowych generowanych wybuchem ładunku materiału wybuchowego w powietrzu (wybuch swobodny) lub na powierzchni ziemi (wybuch kontaktowy). Przedstawiono empiryczne wzory Sadowskiego, Henrycha, Kingery’ego–Bulmasha, a także wzory stosowane w normach NATO oraz w przepisach obowiązujących w Polsce. Stałe we wzorach Kingery’ego–Bulmasha adaptowano do układu SI. Dokonano także aproksymacji danych uzyskanych za pomocą tych wzorów i otrzymano prostszą postać wyrażeń do obliczania charakterystyk fal podmuchowych. Przeprowadzono analizę porównawczą podstawowych parametrów fal podmuchowych, amplitudy i impulsu właściwego, uzyskanych z zastosowaniem różnych wzorów. Pokazano, w jaki sposób wybór metody obliczania parametrów wpływa na wyznaczaną wielkość stref niebezpiecznych dla ludzi ze względu na oddziaływanie fali podmuchowej.

**Słowa kluczowe:** wybuch swobodny i kontaktowy, parametry fal podmuchowych, strefy zagrożenia

## 1. WSTĘP

Do prognozowania skutków działania fali podmuchowej na ludzi i obiekty potrzebna jest informacja o wielkości nadciśnienia wytwarzanego przez tę falę w różnych odległościach od miejsca wybuchu. Profil ciśnienia w fali podmuchowej charakteryzowany jest przez następujące wielkości (*parametry lub charakterystyki fali podmuchowej*): nadciśnienie na czole fali  $P_s$ , maksymalne podciśnienie  $P_d$ , czas trwania dodatniej fazy impulsu  $\tau^+$ , czas trwania ujemnej fazy impulsu  $\tau^-$ . Ponadto jako charakterystykę fali podmuchowej wprowadza się wielkość będącą całką z nadciśnienia po czasie w dodatniej fazie nadciśnienia, tzw. impuls właściwy fali podmuchowej  $I_s$ .

Charakterystyki fali podmuchowej określa się na drodze doświadczalnej poprzez rejestrację czasowego przebiegu nadciśnienia  $\Delta P(t)$  mierzonego za pomocą czujników umieszczonych w różnej odległości od centrum wybuchu. Najbardziej rozpowszechnione wzory uzyskano z aproksymacji danych doświadczalnych dla ładunków trotylowych dla wybuchu swobodnego (wybuch w powietrzu wysoko nad powierzchnią ziemi) i wybuchu kontaktowego (wybuch na powierzchni ziemi). Wzory te umożliwiają także przewidywanie parametrów fal podmuchowych generowanych detonacją innych materiałów wybuchowych, jeśli dostępne są tzw. równoważniki trotylowe dla tych materiałów [1].

Celem prezentowanej pracy było dokonanie przeglądu i porównania metod wyznaczania parametrów fali podmuchowej i zbadanie wpływu wyboru metody na wielkość wyznaczanych stref niebezpiecznych. Porównano najważniejsze parametry z punktu widzenia zagrożenia dla ludzi i budynków: nadciśnienie (amplitudę) na froncie fali i impuls właściwy dla fali padającej oraz, jeśli to było możliwe, amplitudę i impuls fali odbitej.

## 2. WZORY DLA WYBUCHU SWOBODNEGO

Przedstawione zostaną najbardziej znane wzory empiryczne otrzymane dla *sferycznych ładunków trotylowych* dla wybuchu swobodnego. Henrych, bazując na analizie wielu danych eksperymentalnych, przedstawił wzory umożliwiające obliczenie wartości maksymalnej nadciśnienia oraz impulsu fazy dodatniej fali podmuchowej [2].

$$P_s = \begin{cases} \frac{1379,96}{Z} + \frac{543,26}{Z^2} - \frac{35,029}{Z^3} + \frac{0,6129}{Z^4} & [\text{kPa}] \quad \text{dla } 0,05 \leq Z < 0,3 \\ \frac{607,40}{Z} - \frac{31,989}{Z^2} + \frac{209,12}{Z^3} & [\text{kPa}] \quad \text{dla } 0,3 < Z < 1 \\ \frac{64,92}{Z} + \frac{397,19}{Z^2} - \frac{322,44}{Z^3} & [\text{kPa}] \quad \text{dla } 1 \leq Z < 10 \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{I_s}{\sqrt[3]{m_T}} = \begin{cases} 6500 - \frac{10934}{Z} + \frac{6195}{Z^2} - \frac{984,6}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,4 \leq Z < 0,75 \\ -316 + \frac{2069}{Z} - \frac{2118}{Z^2} + \frac{775,5}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,75 \leq Z < 3 \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:  $m_T$  – oznacza masę ładunku trotylu [kg],

$$Z \equiv \frac{R}{\sqrt[3]{m_T}} - \text{tzw. zredukowaną odległość,}$$

$R$  – odległość od centrum wybuchu [m].

Sadowski zaproponował następujące wzory wynikające z analizy wyników pomiarów parametrów fal podmuchowych [3]:

$$P_s = \begin{cases} \frac{1039}{Z^3} - 98,1 \text{ [kPa]} & \text{dla } Z \leq 1 \\ \frac{74,5}{Z} + \frac{245,3}{Z^2} + \frac{637,4}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 1 < Z \leq 15 \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{I_s}{\sqrt[3]{m_T}} = 340 \div 360 \frac{1}{Z} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] \text{ dla } Z > 0,5 \quad (4)$$

W 1984 r. Kingery i Bulmash [4] opracowali zależność wielomianową wysokiego stopnia do obliczania amplitudy, impulsu i innych parametrów fali podmuchowej jako funkcji zredukowanej odległości. Równanie wielomianowe Kingery'ego–Bulmasha (K–B) miało następującą postać ogólną:

$$Y = C_0 + C_1 U + C_2 U^2 + \dots + C_n U^n \quad (5)$$

gdzie:

$$U = K_0 + K_1 \log Z \quad (6)$$

$Y$  jest logarytmem dziesiętnym danego parametru fali podmuchowej,  $C_0, \dots, C_n$  oraz  $K_0$  i  $K_1$  są stałymi, a  $n$  jest stopniem wielomianu.

Wartości współczynników wielomianów zostały przeliczone z angielskich jednostek miary na jednostki układu SI na podstawie danych zawartych w pracach [5-6]. Współczynniki i zakres ich obowiązywania dla dwóch podstawowych parametrów (amplitudy i impulsu właściwego) padającej i odbitej fali podmuchowej przedstawiono w tabelach 1 i 2 dla wybuchu swobodnego sferycznego ładunku trotylu.

Tabela 1. Współczynniki K–B dla amplitudy fali padającej ( $P_s$ ) i fali odbitej ( $P_r$ ) dla wybuchu swobodnego ładunku trotylu

Table 1. The K–B coefficients for the amplitude of the incident ( $P_s$ ) and reflected ( $P_r$ ) waves for air explosion of TNT charge

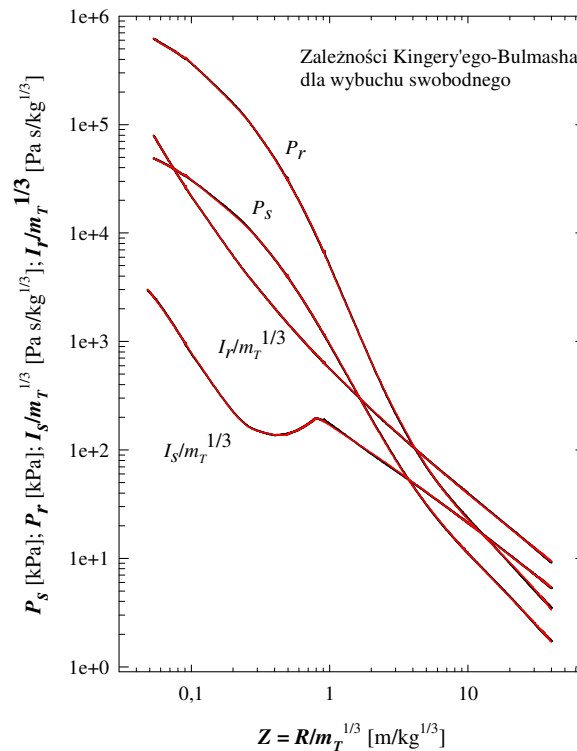
Stała	$P_s$ [kPa]		$P_r$ [kPa]	
	0,0532 < Z ≤ 40		0,0532 < Z ≤ 40	
$C_0$	2,611368669002		3,229580313892	
$C_1$	-1,69012801396		-2,21400538997	
$C_2$	0,00804973591951		0,03511903144	
$C_3$	0,336743114941		0,657599992109	
$C_4$	-0,00516226351334		0,0141818951887	
$C_5$	-0,0809228619888		-0,243076636231	
$C_6$	-0,004785072266747		-0,0158699803158	
$C_7$	0,007930030472244		0,0492741184234	
$C_8$	0,0007684469735		0,00227639644004	
$C_9$	—		-0,00397126276058	
$K_0$	-0,21434313703		-0,21434313703	
$K_1$	1,35034249993		1,35034249993	

Tabela 2. Współczynniki dla impulsu właściwego fali padającej ( $I_s$ ) i fali odbitej ( $I_r$ ) dla wybuchu swobodnego trotylu

Table 2. The K–B coefficients for the impulse of the incident ( $I_s$ ) and reflected ( $I_r$ ) waves for air explosion of TNT charge

Stała	$I_s$ [kPa ms/kg <sup>1/3</sup> ]		$I_r$ [kPa ms/kg <sup>1/3</sup> ]	
	0,0532 < Z ≤ 0,794	0,794 < Z ≤ 40	0,0532 < Z ≤ 40	
$C_0$	2,388305061089	1,551972164658	2,558756497469	
$C_1$	-0,443749377691	-0,40463292088	-0,903118886091	
$C_2$	0,168825414684	-0,014272194608	0,101771877942	
$C_3$	0,0348138030308	0,00912366316617	-0,0242139751146	
$C_4$	-0,010435192824	-0,0006750681404	—	
$C_5$	—	-0,00800863718901	—	
$C_6$	—	0,00314819515931	—	
$C_7$	—	0,00152044783382	—	
$C_8$	—	-0,0007470265899	—	
$K_0$	2,347286410189	-1,753023038680	-0,203984486522	
$K_1$	3,24299066475	2,30629231803	1,37882996018	

Wykorzystując dane zawarte w tabelach 1-2, na rysunku 1 przedstawiono w sposób graficzny zależność parametrów fali podmuchowej od zredukowanej odległości (linie ciągłe koloru czarnego).



Rys. 1. Zależność parametrów fali podmuchowej od zredukowanej odległości dla wybuchu swobodnego sferycznego ładunku trotylowego

Fig. 1. Dependence of blast wave parameters on the reduced distance for air explosion of a spherical charge of TNT

Odczytanie parametrów fali podmuchowej z graficznych zależności w skali logarytmicznej obarczone jest dużym błędem. Korzystanie bezpośrednio ze wzorów Kingery'ego-Bulmasha jest dość kłopotliwe ze względu na wysoki stopień wielomianów. Dlatego w prezentowanej pracy podjęto próbę uzyskania prostszych wzorów na parametry fali podmuchowej metodą aproksymacji danych Kingery'ego-Bulmasha. Postać funkcji aproksymacyjnych i zakres ich stosowności dobierano w taki sposób, aby różnica w wartościach otrzymanych z zależności Kingery'ego-Bulmasha oraz z nowych wzorów była jak najmniejsza. W całym zakresie parametru  $Z$  różnice te nie przekraczały 5%. Na rysunku 1 krzywe aproksymacyjne pokazano linią czerwoną.

Dla wybuchu swobodnego uzyskano następujące, prostsze wzory na charakterystyki fal podmuchowych (padającej i odbitej) generowanych detonacją sferycznego ładunku trotylowego:

$$P_s = \begin{cases} \frac{2034,08}{Z} + \frac{297,03}{Z^2} - \frac{24,76}{Z^3} + \frac{0,564}{Z^4} \text{ [kPa]} & \text{dla } 0,05 < Z \leq 0,3 \\ -\frac{389,32}{Z} + \frac{1512,32}{Z^2} - \frac{175,404}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 0,3 < Z \leq 1,5 \\ -0,6864 + \frac{89,78}{Z} + \frac{200,56}{Z^2} + \frac{778,029}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 1,5 < Z \leq 40 \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{I_s}{\sqrt[3]{m_T}} = \begin{cases} 207,9 - \frac{62,72}{Z} + \frac{14,38}{Z^2} - \frac{0,230}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,05 < Z \leq 0,4 \\ 600,3 - \frac{553,17}{Z} + \frac{220,69}{Z^2} - \frac{29,43}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,4 < Z \leq 0,8 \\ \frac{216,42}{Z} - \frac{65,36}{Z^2} + \frac{17,157}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,8 < Z \leq 40 \end{cases} \quad (8)$$

$$P_r = \begin{cases} \frac{5810,33}{Z} + \frac{7624,94}{Z^2} - \frac{587,405}{Z^3} + \frac{13,808}{Z^4} \text{ [kPa]} & \text{dla } 0,05 < Z \leq 0,3 \\ -\frac{7234,86}{Z} + \frac{13179,39}{Z^2} - \frac{1026,97}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 0,3 < Z \leq 1,0 \\ -2,476 + \frac{238,28}{Z} - \frac{355,97}{Z^2} + \frac{4973,16}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 1,0 < Z \leq 40 \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{I_r}{\sqrt[3]{m_T}} = \begin{cases} -35,62 + \frac{447,87}{Z} + \frac{142,35}{Z^2} + \frac{3,187}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,05 < Z \leq 1,0 \\ \frac{367,62}{Z} + \frac{255,20}{Z^2} - \frac{66,51}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 1,0 < Z \leq 40 \end{cases} \quad (10)$$

Wzory (1-10) można również wykorzystać do obliczania charakterystyk fali podmuchowej dla wybuchu kontaktowego (ładunek położony na powierzchni ziemi) po pomnożeniu masy ładunku przez współczynnik 1,8 [1].

### 3. WZORY DLA WYBUCHU KONTAKTOWEGO

Kingery i Bulmash [4] opracowali również zależności wielomianowe (5) do obliczania amplitudy, impulsu i innych parametrów fali podmuchowej dla wybuchu kontaktowego półsferycznego ładunku trotylowego. Zależności te zostały zaimplementowane w kodzie komputerowym CONWEP [7] i innych kodach wykorzystywanych do oceny skutków oddziaływania fal podmuchowych na obiekty. Wartości stałych dla równań (5) i (6) przedstawiono w tabelach (3) i (4).

Tabela 3. Współczynniki dla amplitudy fali padającej i fali odbitej dla wybuchu kontaktowego

Table 3. The K-B coefficients for the amplitude of the incident and reflected waves for mine explosion of TNT charge

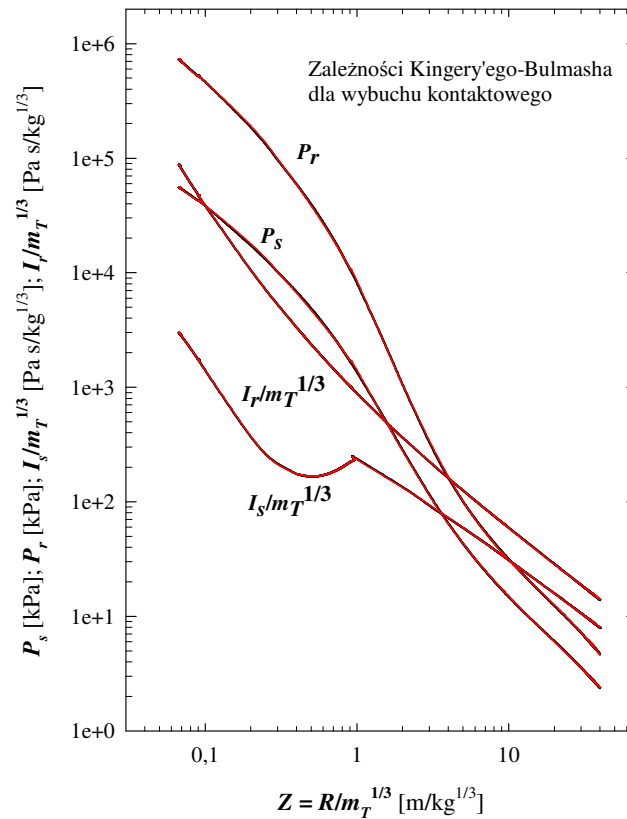
Stałe	$P_s$ [kPa]	$P_r$ [kPa]
	$0,0674 < Z \leq 40$	$0,0674 < Z \leq 40$
$C_0$	2,780769165732	3,402832175812
$C_1$	-1,6958988741	-2,21030870597
$C_2$	-0,154159376846	-0,218536586295
$C_3$	0,514060730593	0,895319589372
$C_4$	0,0988534365274	0,24989009775
$C_5$	-0,293912623038	-0,569249436807
$C_6$	-0,0268112345019	-0,11791682383
$C_7$	0,109097496421	0,224131161411
$C_8$	0,00162846756311	0,0245620259375
$C_9$	-0,0214631030242	-0,0455116002694
$C_{10}$	0,0001456723382	-0,00191930738887
$C_{11}$	0,00167847752266	0,00361471193389
$K_0$	-0,21434313703	-0,240637437179
$K_1$	1,35034249993	1,36637719229

Tabela 4. Współczynniki dla impulsu fali padającej i fali odbitej dla wybuchu kontaktowego

Table 4. The K-B coefficients for the impulse of the incident and reflected waves for mine explosion of TNT charge

Stałe	$I_s$ [kPa ms/kg <sup>1/3</sup> ]		$I_r$ [kPa ms/kg <sup>1/3</sup> ]
	$0,0674 < Z \leq 0,955$	$0,955 < Z \leq 40$	$0,0674 < Z \leq 40$
$C_0$	2,524556102769	1,672820232399	2,705880474549
$C_1$	-0,502992763686	-0,384519026965	-0,949516092853
$C_2$	0,171335645235	-0,0260816706301	0,112136118689
$C_3$	0,0450176963051	0,00595798753822	-0,0250659183287
$C_4$	-0,0118964626402	0,0145445261107	—
$C_5$	—	-0,00663289334734	—
$C_6$	—	-0,00284189327204	—
$C_7$	—	0,0013644816227	—
$K_0$	2,067663854046	-1,947053437684	-0,246189387325
$K_1$	3,0760329666	2,406977454406	1,33422049854

Na rysunku 2 zależności te przedstawiono w formie graficznej (czarna linia ciągła).



Rys. 2. Zależność parametrów fali podmuchowej od zredukowanej odległości dla wybuchu kontaktowego półsferycznego ładunku trotylowego

Fig. 2. Dependence of blast wave parameters on the reduced distance for mine explosion of a semispherical charge of TNT

Podobnie jak poprzednio, dokonano aproksymacji danych Kingery'ego-Bulmasha (linia czerwona na rysunku 2) i otrzymano następujące wzory do obliczania parametrów fali podmuchowej:

$$P_s = \begin{cases} -755,41 + \frac{1459,27}{Z} + \frac{782,11}{Z^2} - \frac{76,86}{Z^3} + \frac{2,350}{Z^4} \text{ [kPa]} & \text{dla } 0,067 < Z \leq 1,5 \\ -0,780 + \frac{120,41}{Z} + \frac{244,29}{Z^2} + \frac{1266,242}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 1,5 < Z \leq 40 \end{cases} \quad (11)$$



$$\frac{I_s}{\sqrt[3]{m_T}} = \begin{cases} 245,81 - \frac{86,99}{Z} + \frac{24,57}{Z^2} - \frac{0,425}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,067 < Z \leq 0,55 \\ 888,49 - \frac{1141,26}{Z} + \frac{613,52}{Z^2} - \frac{112,219}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,55 < Z \leq 0,96 \\ \frac{322,73}{Z} - \frac{138,175}{Z^2} + \frac{49,021}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,96 < Z \leq 40 \end{cases} \quad (12)$$

$$P_r = \begin{cases} -1932,6 - \frac{1561,2}{Z} + \frac{13112,8}{Z^2} - \frac{1196,2}{Z^3} + \frac{36,67}{Z^4} \text{ [kPa]} & \text{dla } 0,067 < Z \leq 1,5 \\ -3,63 + \frac{344,68}{Z} - \frac{851,90}{Z^2} + \frac{8779,05}{Z^3} \text{ [kPa]} & \text{dla } 1,5 < Z \leq 40 \end{cases} \quad (13)$$

$$\frac{I_r}{\sqrt[3]{m_T}} = \begin{cases} -33,37 + \frac{651,55}{Z} + \frac{262,69}{Z^2} + \frac{5,879}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 0,05 < Z \leq 1,5 \\ \frac{549,45}{Z} + \frac{420,05}{Z^2} - \frac{116,017}{Z^3} \text{ [kPa} \cdot \text{ms/kg}^{1/3}] & \text{dla } 1,5 < Z \leq 40 \end{cases} \quad (14)$$

Na podstawie danych Kingery'ego–Bulmasha w normie [8] zaproponowano również prostsze wzory do obliczania charakterystyk fali podmuchowej (tabele 5 i 6).

Tabela 5. Wzory do obliczania amplitudy fali padającej dla wybuchu kontaktowego ładunku trotylu

Table 5. Formulas for calculating the amplitude of the incident wave for mine explosion of TNT charge

Z	$P_s$ [MPa]
$0,50 \leq Z < 0,75$	$P_s = 1,313137 Z^{(-1,910441)}$
$0,75 \leq Z < 3,50$	$P_s = 1,330026 Z^{(-2,218832)}$
$3,50 \leq Z < 8,50$	$P_s = 0,724571 Z^{(-1,726565)}$
$8,50 \leq Z < 30,00$	$P_s = 0,293592 Z^{(-1,295654)}$

Tabela 6. Wzory do obliczania impulsu fali padającej dla wybuchu kontaktowego ładunku trotylu

Table 6. Formulas for calculating the impulse of the incident wave for mine explosion of TNT charge

$Z$	$\frac{I_s}{\sqrt[3]{m_T}}$ [MPa ms/kg <sup>1/3</sup> ]
$0,50 \leq Z < 1,0$	$\frac{I_s}{\sqrt[3]{m_T}} = -41,2564 Z^5 + 144,608 Z^4 - 198,880 Z^3 + 134,238 Z^2 - 44,3554 Z + 5,8956$
$1,0 \leq Z < 30$	$\frac{I_s}{\sqrt[3]{m_T}} = 0,254674 Z^{(-0,918606)}$

W Polsce, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 27 października 2010 r. [9], zdolność danego materiału wybuchowego do generowania fali uderzeniowej określa się porównawczo w stosunku do wzorcowego materiału wybuchowego (*krystalicznego heksogenu*), wykorzystując współczynnik zagrożenia  $R_Z$ . Współczynnik  $R_Z$  wyznacza się doświadczalnie na drodze badań modelowych lub oblicza według wzoru:

$$R_Z = 4,71 \cdot 10^{-4} \cdot (Q \cdot V)^{0,5} \quad (15)$$

gdzie  $Q$  – oznacza ciepło wybuchu danego materiału [kJ/kg],  $V$  – objętość właściwą produktów wybuchu danego materiału wybuchowego w warunkach normalnych [dm<sup>3</sup>/kg].

Równoważnik heksogenowy ( $G$ ), wyrażony w kilogramach wzorcowego heksogenu, dla magazynowanego ładunku zdolnego do generowania takiej samej fali uderzeniowej wyznacza się według wzoru:

$$G = R_Z M \quad (16)$$

gdzie:  $M$  [kg] jest masą netto materiału wybuchowego zawartego w magazynowanym ładunku. W przypadku magazynowania w obiekcie kilku materiałów wybuchowych, do obliczeń przyjmuje się sumę równoważników heksogenowych ich ładunków.

Nadciśnienie fali uderzeniowej ( $P_s$  [kPa]) jako funkcję odległości czoła fali ( $R$  [m]) od miejsca wybuchu oraz równoważnika heksogenowego magazynowanego ładunku ( $G$  [kg]) oblicza się według wzoru:

$$P_s = 980 \left( RG \frac{1}{3} \right)^{-1,89} \quad (17)$$

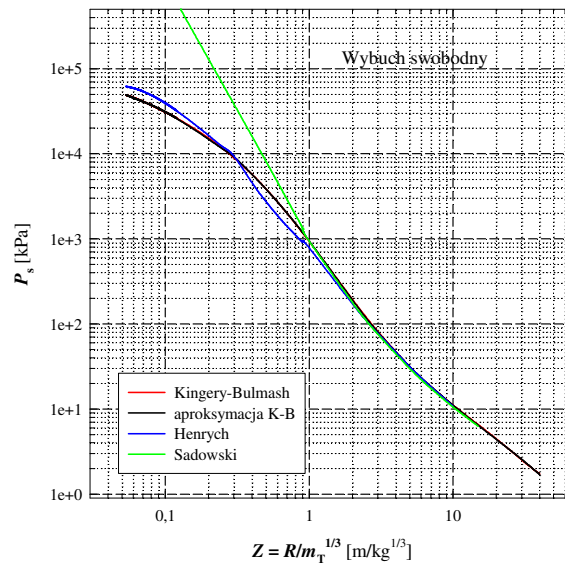
W praktyce inżynierskiej często korzysta się z uproszczonego wzoru Własowa na określenie wielkości amplitudy fali podmuchowej [10-11]:

$$P = 3200 \frac{\sqrt[3]{m_T^2}}{R^2} \quad [\text{kPa}] \quad (18)$$

gdzie:  $R$  – odległość od miejsca wybuchu [m],  $m_T$  – masa trotylu [kg]. W pracach [10-11] nie podano, czy jest to ciśnienie fali padającej czy odbitej.

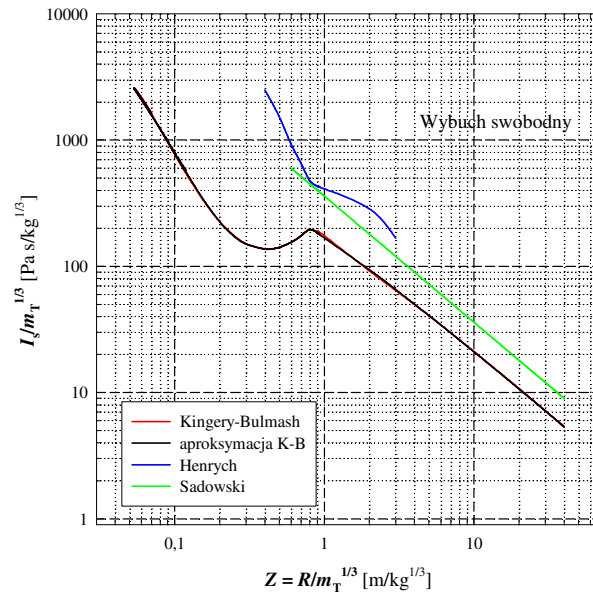
#### 4. PORÓWNANIE WZORÓW DO WYZNACZANIA CHARAKTERYSTYK FAL PODMUCHOWYCH

Dokonano porównania empirycznych wzorów do wyznaczania parametrów fali podmuchowej. Dla danych wejściowych w postaci zredukowanej odległości, w przedziale obowiązywania wzorów otrzymane wyniki przedstawiono na rysunkach 3 i 4 dla wybuchu swobodnego ładunku trotylowego oraz na rysunkach 5 i 6 dla wybuchu kontaktowego. W przypadku zastosowania wzorów (15-17), wartości  $Q$  i  $V$  dla trotylu zaczerpnięto z poradnika [12] (ciepło wybuchu – 4560 kJ/kg, objętość właściwa – 825 dm<sup>3</sup>/kg). Wzory Sadowskiego i Henrycha podane dla wybuchu swobodnego zastosowano także dla wybuchu kontaktowego, mnożąc masę ładunku trotylu przez współczynnik 1,8.



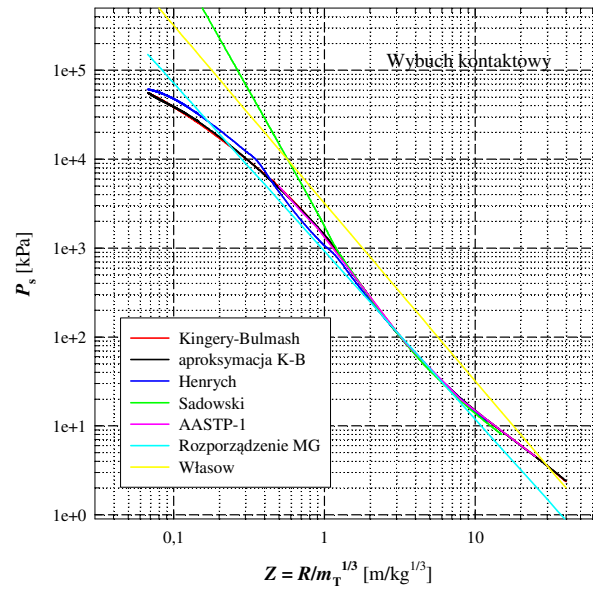
Rys. 3. Zależność amplitudy fali podmuchowej od zredukowanej odległości dla wybuchu swobodnego

Fig. 3. Dependence of the blast wave amplitude on the reduced distance for air explosion



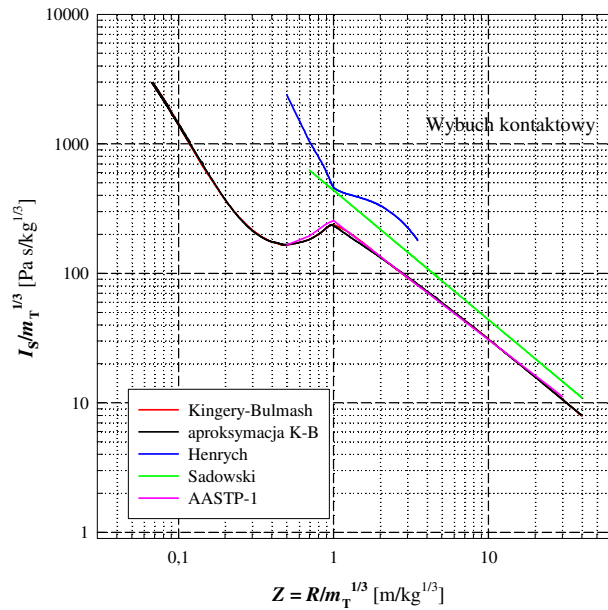
Rys. 4. Zależność impulsu właściwej fali podmuchowej od zredukowanej odległości dla wybuchu swobodnego

Fig. 4. Dependence of the blast wave impulse on the reduced distance for air explosion



Rys. 5. Zależność amplitudy fali podmuchowej od zredukowanej odległości dla wybuchu kontaktowego

Fig. 5. Dependence of the blast wave amplitude on the reduced distance for mine explosion



Rys. 6. Zależność impulsu fali podmuchowej od zredukowanej odległości dla wybuchu kontaktowego

Fig. 6. Dependence of the blast wave impulse on the reduced distance for mine explosion

W przypadku wybuchu swobodnego, wzory Sadowskiego, Henrycha i Kingery’ego–Bulmasha na amplitudę padającej fali podmuchowej dają wyniki niewiele różniące się od siebie dla zredukowanej odległości większej od 1. Wyniki otrzymane ze wzorów Henrycha i Kingery’ego–Bulmasha są tego samego rzędu wielkości. Natomiast wzór Sadowskiego dla  $Z < 1$  daje wyniki różniące się nawet o dwa rzędy wielkości. Należy zwrócić uwagę na fakt, że wzór Sadowskiego w przedziale  $Z \in (1, 15)$ , w którym daje zbliżone wyniki do pozostałych wzorów, ma inną postać niż dla  $Z \leq 1$ . Wzór Sadowskiego dla  $Z \leq 1$  został wyprowadzony na podstawie analizy parametrów fali podmuchowej po wybuchu jądrowym. Z tego powodu nie może być stosowany do wyznaczania maksymalnego nadciśnienia i impulsu właściwego fali podmuchowej po wybuchu ładunku trotylowego.

W przypadku impulsu fali podmuchowej wszystkie wzory (oprócz wzorów będących wynikiem aproksymacji wzorów K–B) dają wyniki bardzo różniące się od siebie. Jednak można zauważyć, że krzywe uzyskane ze wzorów Henrycha i Sadowskiego są znacznie przesunięte w górę w porównaniu do krzywych K–B, co może sugerować, że wzory Sadowskiego i Henrycha dotyczą impulsu odbitej fali podmuchowej. Jednak w pracy [2] przytoczono je jako wzory do obliczania impulsu fali padającej.

Dla wybuchu kontaktowego krzywa nadciśnienia fali podmuchowej obliczona ze wzorów Henrycha i Kingery'ego–Bulmasha ma podobny przebieg, jak w przypadku wybuchu swobodnego, a wyniki są tego samego rzędu wielkości. Metoda zamieszczona w AASTP-1 (tabele 5 i 6) jest aproksymacją wzorów Kingery'ego–Bulmasha i daje wyniki zbliżone. Ze wzoru Sadowskiego w przypadku wybuchu kontaktowego otrzymuje się podobne wyniki, jak ze wzorów Kingery'ego–Bulmasha i Henrycha dla  $Z > 1$ , natomiast dla  $Z \leq 1$  wyniki są zupełnie różne – sytuacja jest taka sama, jak w przypadku wybuchu swobodnego. Wyniki uzyskane za pomocą wzoru umieszczonego w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki pokrywają się tylko w niewielkim przedziale  $Z \in (2, 8)$  z danymi otrzymanymi ze wzorów Kingery'ego–Bulmasha. Nie uwzględniając wzoru Sadowskiego, wzór Własowa w całym przedziale daje większe wartości nadciśnienia od pozostałych wzorów. Może to świadczyć o tym, że obliczona wartość nadciśnienia nie jest wartością fali padającej, a odbitej. Wniosku tego nie udało się potwierdzić w żadnym dostępnym źródle literaturowym.

## 5. WYZNACZENIE STREF ZAGROŻENIA DLA LUDZI

Zbadano, w jaki sposób wybór wzoru do określania parametrów fali podmuchowej wpływa na wyznaczone strefy zagrożenia dla ludzi. Skorzystano z kryteriów podanych w instrukcjach dla saperów (tabela 7 – [10]) i policji (tabela 8 – [11]). Do obliczeń przyjęty został magazyn o lekkiej konstrukcji. Założenie to pozwala zaniedbać straty energii na zniszczenie budynku. Przyjęta do obliczeń ilość materiału wybuchowego była równoważna energetycznie masie 1500 kg trotylu.

Tabela 7. Skutki działania nadciśnienia fali podmuchowej na człowieka według instrukcji [10]

Table 7. Airblast effects on people according to the instruction [10]

Skutki działania	$P_s$ [kPa]
Ciśnienie bezpieczne dla ludzi	< 10
Uszkodzenie błony bębenkowej	17,5
Uszkodzenie układu oddechowego (pęknięcie płuc)	40
Poważne kontuzje	300
Śmierć	> 300

Tabela 8. Skutki działania nadciśnienia fali podmuchowej na człowieka według instrukcji [11]

Table 8. Airblast effects on people according to the instruction [11]

Skutki działania	$P_s$ [kPa]
Ciśnienie bezpieczne	< 20
Lekkie urazy – krótkotrwałe uszkodzenie narządów słuchu, lekkie potłuczenia	40
Średnie urazy – uszkodzenia całego organizmu, krwotoki, omdlenia, złamania i zwichnięcia kończyn	50
Ciężkie urazy – poważne uszkodzenia całego organizmu, uszkodzenia mózgu i jamy brzusznej, silne krwotoki	100
Bardzo ciężkie urazy – uszkodzenia kończące się śmiercią	> 100

W tabelach 9 i 10 porównano odległości (strefy zagrożenia), na jakich występują nadciśnienia fali podmuchowej obliczone za pomocą analizowanych wzorów dla kryteriów przedstawionych w tabelach 7 i 8. Największą zgodność wyników uzyskuje się dla odległości bliskich wybuchowi ( $P_s = 300$  kPa), z wyjątkiem wzoru Własowa. Wraz ze wzrostem odległości różnice między maksymalnym nadciśnieniem, wyznaczonym za pomocą analizowanych wzorów, zaczynają rosnać, co powoduje duże różnice w obliczonych promieniach strefy o danym zagrożeniu. Jednak biorąc pod uwagę fakt, że ciśnienie bezpieczne dla człowieka wynosi od 10 kPa [10] do 20 kPa [11], różnice w odległościach, na których występują takie ciśnienia są niewielkie. Metoda zamieszczona w rozporządzeniu [9] jedynie dla małych wartości ciśnienia krytycznego daje wynik rozbieżny od pozostałych (mniejszy promień strefy bezpiecznej).

Tabela 9. Odległości odpowiadające granicznym nadciśnieniom podanym w tabeli 7

Table 9. Distances corresponding to overpressure limits described in Table 7

$P_s$ [kPa]	$R$ [m]						
	Sadowski	Henrych	K-B	Aproks. K-B	AASTP-1	Własow	Rozp. Min. Gosp.
10	145	---	154	155	156	205	126
17,5	98	100	102	103	101	155	94
40	59	61	60	60	61	103	60
300	22	21	22	22	22	38	21

Tabela 10. Odległości odpowiadające granicznym nadciśnieniom podanym w tabeli 8

Table 10. Distances corresponding to overpressure limits described in Table 8

$P_s$ [kPa]	R [m]						
	Sadowski	Henrych	K-B	Aproks. K-B	AASTP-1	Własow	Rozp. Min. Gosp.
20	89	92	93	94	92	145	87
40	59	61	60	60	61	103	60
50	52	53	53	53	54	92	54
100	37	37	37	37	37	65	37

## 6. PODSUMOWANIE

W pracy dokonano przeglądu metod wyznaczania parametrów fali podmuchowej i zbadano wpływ wyboru metody na wielkość stref niebezpiecznych dla ludzi. Na podstawie analizy obliczonych parametrów fali podmuchowej i wielkości stref wyciągnięto następujące wnioski:

1. Zależności nadciśnienia fali podmuchowej w funkcji zredukowanej odległości wyznaczone za pomocą analizowanych wzorów są zgodne dla zredukowanej odległości  $Z > 1$ , zarówno w przypadku wybuchu swobodnego, jak i kontaktowego. Wyjątkiem jest zależność uzyskana ze wzoru Własowa. Dla  $Z < 1$  różnice w wartościach nadciśnienia obliczonego różnymi wzorami są znaczne. Wzory aproksymacyjne zależności Kingery'ego-Bulmasha dobrze przybliżają tę zależność w całym zakresie jej stosowalności.
2. Różnice w przebiegu impulsu właściwego fali podmuchowej w funkcji zredukowanej odległości są duże w całym przedziale ich stosowalności, z wyjątkiem wzorów aproksymujących zależność Kingery'ego-Bulmasha.
3. Wybór metody obliczania amplitudy nadciśnienia fali podmuchowej nie wpływa, z wyjątkiem wzoru Własowa, na wielkość strefy zagrożenia śmiercią lub ciężkim uszkodzeniem ciała. Natomiast ma pewien wpływ na wyznaczaną wielkość strefy całkowicie bezpiecznej dla człowieka.

## LITERATURA

- [1] Cudziło Stanisław, Andrzej Maranda, Jerzy Nowaczewski, Radosław Trębiński, Waldemar A. Trzcíński. 2000. *Wojskowe materiały wybuchowe*. Częstochowa: Wydawnictwo Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej.



- 
- [2] Henrych Josef. 1979. *The Dynamic of Explosion and its Use*. Academia, Prague.
  - [3] Sadovsky M.A. 2004. Mechanical effects of air shockwaves from explosions according to experiments, In *Geophysics and Physics of Explosion* (ed. M.A. Sadovsky). Moscow: Nauka Press.
  - [4] Kingery Charles N., Gerard Bulmash, 1984. *Airblast Parameters from TNT Spherical Air Burst and Hemispherical Surface Burst*. BRT Technical Report ARBRL-TR-02555, Aberdeen: US Army Armament Research and Development Center, Ballistic Research Laboratory.
  - [5] Chock Jeffrey M.K. 1999. *Review of Methods for Calculating Pressure Profiles of Explosive Air Blast and its Sample Application*. Master Thesis. Blacksburg Virginia.
  - [6] Cormie David, William Wilkinson, Jinwon Shin, Andrew Whittaker. 2013. Scaled-distance relationships for close-in detonations, In *Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures*, 16-20. Potsdam Germany.
  - [7] CONWEP: *Conventional Weapons Effects Program*. 1991. US Army Waterways Experimental Station, Vicksburg.
  - [8] *AASTP-1 – Manual of NATO Safety Principles for the Storage of Military Ammunition and Explosives, Part II*. 2006. NATO International Staff – Defence Investment Division.
  - [9] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 27 października 2010 r. w sprawie pomieszczeń magazynowych i obiektów do przechowywania materiałów wybuchowych, broni, amunicji oraz wyrobów o przeznaczeniu wojskowym lub policyjnym (Dz.U. nr 222, poz. 1451).
  - [10] *Prace minerskie i niszczenia*. 1995. Sztab Generalny WP, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych.
  - [11] Olbrycht Marek, Jerzy Rutkowski. 1997. *Bezpieczeństwo prac minersko-pirotechnicznych w działaniach antyterrorystycznych*. Centrum Kształcenia Policji Legionowo.
  - [12] Meyer Rudolf, Josef Kohler, Axel Hamburg. 2002. *Explosives*, WILEY – VCH Weinheim.

## A Review of Methods for Calculation of Blast Wave Parameters

Waldemar A. TRZCIŃSKI

**Abstract.** The paper is a review of the methods that are the most commonly used for calculating the parameters of blast waves generated by an explosion in air (air explosion) or on the surface of the earth (mine explosion). The empirical formulae of Sadoyskiy, Henrych, Kingery-Bulmash and the models used in NATO standards and Polish regulations are presented. Constants in the Kingery-Bulmash formulae were adopted to SI system. Data obtained using this model were approximated to give a simpler form of formulae for calculating the blast characteristics. A comparative analysis of the basic parameters of blast waves, the amplitude and specific impulse, obtained with different ways was done. It was shown how the choice of the method of calculation of the blast parameters affected the size of the hazard zones for people.

**Keywords:** air and mine explosion, parameters of blast waves, hazard zones