

Materiały Wysokoenergetyczne / High-Energetic Materials, 2015, 7, 14 – 30
ISSN 2083-0165

Wyznaczanie stref zagrożenia odłamkami **Determination of hazard areas for metal fragments**

Waldemar A. Trzeciński, Jakub Hańderek

Wojskowa Akademia Techniczna, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa, PL

Streszczenie: *W pracy dokonano przeglądu metod stosowanych w Polsce i w krajach NATO do wyznaczania stref zagrożenia odłamkami. Szczegółowo omówiono procedurę obliczania stref zagrożenia przedstawioną w normie STANAG 4440. Zaproponowano własną metodę określania maksymalnego zasięgu dla odłamków niebezpiecznych dla ludzi.*

Dla modelowego pocisku obliczono prędkość początkową i rozkład masowy odłamków oraz wyznaczono strefy zagrożenia dla ludzi oraz maksymalny zasięg odłamków dla różnych poziomów bezpieczeństwa. Podobne obliczenia wykonano dla modelowego stosu amunicji. Porównano uzyskane rezultaty z wielkościami stref określonych w przepisach obowiązujących w Polsce.

Abstract. *The paper presents an overview of methods used in Poland and NATO countries for determining hazard zones for fragments. The procedure for calculating the hazard zones presented in the STANAG 4440 is discussed in detail. The method was proposed to estimate the maximum distance for debris dangerous to humans.*

For a model projectile the initial velocity and mass distribution of fragments were calculated and the zone of hazard to humans and maximum distance for fragments for different security levels were determined. Similar calculations were performed for a model stack of ammunition. The results obtained were compared with the zones specified in the Polish regulations.

Słowa kluczowe: *amunicja, zagrożenia odłamkami, strefy bezpieczne dla odłamków*

Key words: *munition, fragment hazard, safety distances for metal fragments*

1. Wstęp

W większości zastosowań wojskowych materiałów wybuchowych czynnikiem rażącym nie jest bezpośrednie działanie fali podmuchowej, lecz uderzenie pocisku lub odłamka napędzonego działaniem ciśnienia produktów detonacji. W tym przypadku wykorzystuje się miotające działanie wybuchu. Pociskiem napędzonym wybuchem może być strumień kumulacyjny, pocisk formowany wybuchowo, fragment skorupy pocisku odłamkowo-burzącego lub granatu ręcznego. Mogą nim być elementy (np. kulki) umieszczone razem z ładunkiem materiału wybuchowego w bombie rozpryskowej.

W przypadku pocisków odłamkowo-burzących, rozpryskowych lub improwizowanych urządzeń wybuchowych o zamkniętej, ciężkiej (grubościennej) obudowie głównym czynnikiem rażącym są odłamki. Liczba odłamków, ich kształt oraz prędkość początkowa, a co za tym idzie strefa ich skutecznego oddziaływania, są ściśle związane z energią zastosowanego materiału wybuchowego oraz właściwościami mechanicznymi obudowy. Istnieje bogata literatura naukowa, cytowana na przykład w monografii [1], poświęcona charakterystyce odłamków i szacowaniu ich prędkości początkowej. W prezentowanej pracy zostaną omówione normy obowiązujące w Polsce i w krajach NATO umożliwiające ocenę wielkości stref zagrożenia odłamkami. W oparciu o przepisy normalizacyjne wyznaczono strefy zagrożenia dla ludzi po wybuchu modelowego pocisku oraz modelowego stosu amunicji.

2. Sposoby wyznaczania stref zagrożenia odłamkami

2.1. Strefy zagrożenia odłamkami według przepisów obowiązujących w Polsce

Liczba regulacji prawnych dotyczących prognozowania stref zagrożenia odłamkami jest w Polsce niewielka. W instrukcji [2] do wyznaczenia stref zagrożenia odłamkami podczas niszczenia amunicji i bomb lotniczych podano promień rozrzutu odłamków (tabele 1 i 2). Nie podano metod lub źródeł uzyskania tych danych ani warunków, w jakich niszczona jest amunicja i bomby.

Tab. 1. Promień rozrzutu odłamków przy wysadzeniu jednostki amunicji [2]

Kaliber pocisku [mm]	Promień rozrzutu odłamków [m]
37 ÷ 76	500
76 ÷ 105	700
105 ÷ 150	1000
150 ÷ 200	1200
200 ÷ 300	1500
300 ÷ 400	1500
powyżej 400	1500

Tab. 2. Promień rozrzutu odłamków przy wysadzeniu bomb lotniczych [2]

Masa bomby lotniczej [kg]	Promień rozrzutu odłamków [m]
20 ÷ 50	850
100	1000
250	1200
500	1350
1000	1500
1500	1600
2500	1800
do 5000	2000

W załączniku do [3] podano minimalne odległości zagrożonych obiektów od magazynów bazowych, w których przechowywane są materiały wybuchowe i amunicja zaklasyfikowane m. in. do klasy 1 podklasy 1.1, 1.2 lub 1.5, a w wyniku wybuchu może dojść do miotania ciężkich odłamków. Odległości te zestawiono w tabelach 3 i 4.

Tab. 3. Odległości dla magazynu bazowego, w którym składowane są materiały wybuchowe i amunicja zaliczana do klasy 1 podklasy 1.2 i klasy 9 [3]

Magazyn, obiekt produkcyjny zawierający materiał wybuchowy	Obiekt produkcyjny nie zawierający materiału wybuchowego	Droga dojazdowa i droga lokalna	Autostrada i droga o dużym natężeniu ruchu	Obszar zamieszkały
min. 135 m	min. 135 m	$L_d = 51 \cdot G^{\frac{1}{6}}$ min. 90 m	$L_d = 76 \cdot G^{\frac{1}{6}}$ min. 135 m	

Występujące w tabeli 3 wielkości oznaczają:

L_d – minimalna dopuszczalna odległość [m],

G – równoważnik heksogenowy materiału zgromadzonego w magazynie [kg].

Tab. 4. Odległości dla magazynu bazowego, w którym składowane są materiały wybuchowe i amunicja zaklasyfikowane do klasy 1 podklasy 1.1 i 1.5 oraz do klas 3 i 4.1 [2]

Lp.	Rodzaj zagrożonego obiektu, w stosunku do którego jest wyznaczana bezpieczna odległość	Minimalna dopuszczalna odległość [m]
1	Magazyn materiałów i przedmiotów wybuchowych w opakowaniach transportowych, budynek produkcyjny bez stałej obsady.	180
2	Budynek do produkcji materiałów wybuchowych typu bunkrowego ze stałą obsadą i obiekt towarzyszący oraz magazyn półfabrykatów.	180
3	Budynek produkcyjny inny niż wymieniony w Lp. 1 i 2, w tym obiekty do produkcji materiałów wybuchowych, obiekt o przeznaczeniu higieniczno-sanitarnym, laboratoryjny, pomocniczy, droga dojazdowa do zakładu, ogrodzenie zewnętrzne zakładów, lokalna droga poza obszarem zabudowanym, napowietrzna linia wysokiego napięcia.	180
4	Obiekt niewymieniony w Lp. 1-3, w tym: 1) obszar zabudowy rozproszonej, 2) obszar zabudowy zwartej, 3) autostrada i droga o dużym natężeniu ruchu, 4) pozostały, tj. niebędący obszarem zabudowy zwartej lub rozproszonej, autostradą i drogą o dużym natężeniu ruchu.	275
5	Obiekt użyteczności publicznej, w którym gromadzi się duża liczba ludzi, taki jak: miejsce kultu, szpital, placówka oświatowo-wychowawcza, plac i hala targowe, obiekt rekreacyjno-sportowy itp.	400

Zastosowana w rozporządzeniu [3] klasyfikacja materiałów wybuchowych została zdefiniowana w umowie europejskiej dotyczącej międzynarodowego przewozu drogowego towarów niebezpiecznych (ADR) [4]. Do podklasy 1.1 zalicza się substancje i przedmioty, które stwarzają zagrożenie wybuchem masowym. Podklasa 1.2 to substancje i przedmioty, które stwarzają zagrożenie rozrzutem, ale nie wybuchem masowym. Do podklasy 1.5 zalicza się substancje bardzo mało wrażliwe stwarzające zagrożenia wybuchem masowym, które są na tyle niewrażliwe, że istnieje małe prawdopodobieństwo ich zainicjowania lub przejścia palenia w detonację w normalnych warunkach. Klasa 3 to materiały ciekłe zapalne, klasa 4.1 to materiały stałe zapalne a klasa 9 to różne materiały i przedmioty niebezpieczne.

2.2. Strefy zagrożenia odłamkami według przepisów obowiązujących w NATO

Według przepisów standaryzacyjnych AASTP-1 (STANAG 4440) [5] ocena zagrożenia odłamkami opiera się głównie na rachunku prawdopodobieństwa. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest fakt, że tworzenie odłamków to proces, który ma miejsce w warunkach fizycznych nie do końca zdefiniowanych. Parametry balistyczne i rozkład odłamków stanowią podstawę oceny potencjalnego zagrożenia, tzn. oszacowania rodzaju oraz wielkości uszkodzeń. Do parametrów balistycznych należy prędkość początkowa, kąt wylotu jak również masa odłamków, natomiast rozkład odłamków określa się ze względu na ilość i masę miotanych odłamków.

Ładunki cylindryczne charakteryzują się tym, że większość odłamków wyrzucana jest w kierunku radialnym. Jedynie niektóre odłamki o dużej masie (ciężkie), mające niewielką prędkość, są wyrzucane w kierunku równoległym do powierzchni bocznej pocisku i stanowią mniejsze zagrożenie.

W zależności od konstrukcji i usytuowania magazynu zagrożenie odłamkami można określić w sposób następujący:

- magazyny odkryte – pełne zagrożenie odłamkami,
- magazyny bez pokrywy ziemnej (zabezpieczone tylko wałem albo nasypem) – zmniejszone zagrożenie odłamkami, elementy konstrukcji magazynu zatrzymują większe odłamki, prędkość odłamków jest mniejsza o około 85%,
- magazyny amunicji pokryte ziemią (ukryte) – znikome zagrożenie odłamkami.

W celu oszacowania rozkładu masy odłamków w normie [5] wprowadzono parametr M_A zdefiniowany w sposób następujący

$$M_A = B_x \cdot t_c^{\frac{5}{6}} \cdot d_i^{\frac{1}{3}} \cdot \left(1 + \frac{t_c}{d_i}\right) \quad (1)$$

gdzie: B_x – stała Motta, charakterystyczna dla danego materiału wybuchowego [$\text{kg}^{1/2}\text{m}^{-7/6}$]; t_c – grubość skorupy pocisku [m]; d_i – średnica wewnętrzna skorupy [m]. Wielkości stałej Motta dla typowych materiałów wybuchowych stosowanych w amunicji przedstawiono w tabeli 5.

Tab. 5. Wielkości stałej Motta B_x dla wybranych materiałów wybuchowych [5]

Material wybuchowy	B_x [$\text{kg}^{1/2}\text{m}^{-7/6}$]	Material wybuchowy	B_x [$\text{kg}^{1/2}\text{m}^{-7/6}$]
Amatol	4,279	Pentolit (TNT/PETN 50/50)	3,032
Baratol	6,260	Pentryl (PETN)	3,033
Kompozycja A-3	2,688	PTX-1 (RDX/tetryl/TNT)	2,712
Kompozycja B (RDX/TNT 64/36)	2,712	PTX-2 (RDX/PETN/TNT)	2,778
Cyclotol (RDX/TNT 75/25)	2,410	Heksogen (RDX)	2,594
Cyclotol (RDX/TNT 60/40)	3,301	Tetryl	3,329
HBX-1 (RDX/TNT/AL/WAX)	3,375	Trotyl (TNT)	3,815
H-6 (RDX/TNT/AL/WAX)	3,127	Torpex-2 (RDX/TNT/AL)	3,811
HBX-3 (RDX/TNT/AL/WAX)	3,949		

Rozkład masy odłamków wyraża się w postaci łącznej ilości odłamków N_f o masie większej od M_f . Do określenia rozkładu masy odłamków wykorzystuje się najczęściej wzór Motta

$$N_f = \frac{M_t}{M_0} \cdot e^{-\sqrt{2 \cdot \frac{M_f}{M_0}}} \quad (2)$$

lub, z uwzględnieniem wzoru (1), wzór z pracy [6]

$$N_f = \frac{M_t}{2 \cdot M_A^2} \cdot e^{-\frac{\sqrt{M_f}}{M_A}} \quad (3)$$

gdzie: M_t – całkowita masa odłamków [kg]; M_0 – średnia masa odłamka [kg]; M_f – określona masa odłamka [kg]. Całkowita liczba odłamków powstałych po detonacji pojedynczej amunicji wynosi

$$N_t = \frac{M_c}{2M_A^2} \quad (4)$$

gdzie: M_c – masa skorupy pocisku [kg].

Masę tzw. nominalnego odłamka M_d (odłamka „niebezpiecznego” dla wybranego poziomu bezpieczeństwa) określają wzory:

$$M_d = M_A^2 \cdot \ln^2(1 - C_L) \text{ dla } 0,9500 \leq C_L \leq 0,9999 \quad (5)$$

$$M_d = M_A^2 \cdot \ln^2 \left[1 - C_L \left(1 - e^{\frac{\sqrt{M_c}}{M_A}} \right) \right] \text{ dla } 0,9999 \leq C_L \leq 1,0000 \quad (6)$$

gdzie: C_L – poziom bezpieczeństwa oznaczający udział ilościowy odłamków o masie mniejszej od M_d w całkowitej liczbie odłamków. Wielkość $(1 - C_L)$ oznacza udział ilościowy niebezpiecznych odłamków o masie większej lub równej M_d . Liczba odłamków o masie nie mniejszej niż M_d wynosi więc

$$N_d = N_t \cdot (1 - C_L) = \frac{M_c}{2 \cdot M_A^2} \cdot e^{-\frac{\sqrt{M_c}}{M_d}} \quad (7)$$

Z praktycznego punktu widzenia najważniejszym parametrem jest ilość ciężkich odłamków, ponieważ są one najskuteczniejsze pod względem charakterystyk balistycznych (zasięg) oraz potencjalnej energii kinetycznej. Zastosowanie wzoru (7) ze szczególnym położeniem nacisku na duże odłamki, pomocne jest przy definiowaniu poziomu zagrożenia.

Jeżeli rozkład masy, prędkość początkowa i kąt wylotu odłamka w miejscu detonacji są znane, to może być wyznaczona trajektoria lotu odłamka i rozkład gęstości odłamków w danej odległości od wybuchu. Wpływ na tor lotu mają takie czynniki, jak warunki atmosferyczne i grawitacja. Powinny one być również wzięte pod uwagę przy obliczeniach, celem których jest znalezienie strefy bezpiecznej ze względu na odłamki.

Wstępnie można przyjąć, że różne w rzeczywistości fragmenty są geometrycznie podobne. Masa odłamków M_f i ich powierzchnia przekroju A_f są zależne od siebie i skorelowane przez współczynnik k .

$$M_f = k \cdot A_f^{\frac{3}{2}} \quad [kg] \quad (8)$$

Współczynnik k to tzw. gęstość balistyczna, która wyznaczana jest eksperymentalnie z testów balistycznych i zależy od rodzaju amunicji. Wielkości współczynnika k dla różnych rodzajów amunicji przedstawiono w tabeli 6.

Tab. 6. Współczynnik gęstości balistycznej dla wybranych rodzajów amunicji [5]

k [g/cm ³]	Rodzaj amunicji lub kształt odłamka
2,33	bomby burzące
2,61	amunicja i bomby odłamkowe
4,27	stalowy sześciian i cylinder
5,89	stalowa kula

Prędkość początkowa odłamka V_0 może być oszacowana ze wzoru Gurneya zapisanego w postaci ogólnej

$$V_0 = \frac{V_G}{\sqrt{\frac{M_G + n}{m} + \frac{n}{n+2}}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (9)$$

gdzie: V_G – prędkość Gurneya, stała dla danego materiału wybuchowego [m/s]; $n = 1, 2, 3$ – stała geometryczna ($n = 1$ – dla dwu płaskich obudów o jednakowej grubości, $n = 2$ – dla cylindra, $n = 3$ – dla sfery), m – masa materiału wybuchowego [kg]; M_G – masa skorupy [kg]. Wartości prędkości Gurneya dla szerokiej gamy materiałów wybuchowych podano m. in. w [1, 5].

Dla praktycznego wyznaczenia zasięgu, prędkość odłamka $V_{(R)}$ jako funkcja odległości może być oszacowana z funkcji wykładniczej (wzór 10), w której przyjmuje się stały współczynnik oporu aerodynamicznego i pomija grawitację

$$V_{(R)} = V_0 \cdot e^{-\frac{R}{L}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (10)$$

$$L = \frac{2 \cdot \sqrt[3]{k^2 \cdot M_f}}{C_D \cdot rho} \quad [m]$$

gdzie: L – odległość, na której prędkość lecącego odłamka spadnie do 1/e prędkości początkowej [m]; R – odległość odłamka od miejsca wybuchu [m]; rho – gęstość powietrza [kg/m³]; C_D – stała oporu aerodynamicznego (przykładowe wartości przedstawiono w tabeli 7).

Prędkość w chwili uderzenia w obiekt lub upadku na ziemię zmienia się pomiędzy prędkością dla bliższego obszaru oddziaływania odłamków ($R_e < L$, gdzie R_e – efektywny promień rażenia [m])

$$V_i = V_0 \cdot e^{-\frac{Re}{L}} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (11)$$

oraz wzoru na prędkość swobodnego spadku, która jest prędkością dla dalszego obszaru oddziaływania odłamków ($R_e > L$)

$$V_i = \sqrt{g \cdot L} \quad \left[\frac{m}{s} \right] \quad (12)$$

gdzie: $g = 9,81$ m/s.

Tab. 7. Wielkości stałej oporu aerodynamicznego dla różnych prędkości odłamków [5]

Stała oporu aerodynamicznego dla kuli		Opór aerodynamiczny dla nieregularnych odłamków	
V [m/s]	C_D	V [m/s]	C_D
0	0,46	0	1,08
100	0,48	204	1,08
170	0,50	272	1,12
255	0,62	340	1,24
340	0,80	408	1,36
425	0,96	476	1,40
510	1,00	544	1,40
680	1,02	680	1,36
1020	0,98	1020	1,28
1430	0,92	1700	1,20
3060	0,92	3060	1,12

Energia w chwili uderzenia i impuls (pęd) uderzenia są decydującymi parametrami dla oceny poziomu zagrożenia odłamkiem. Parametrami podstawowymi do obliczenia energii uderzenia E_i i impulsu uderzenia I_i są masa odłamka M_f i prędkość w chwili upadku V_i .

$$E_i = E_{kin} = \frac{M_f \cdot V_i^2}{2} \quad [J] \quad (13)$$

$$I_i = M_f \cdot V_i \quad [Ns] \quad (14)$$

Prawdopodobieństwo uderzenia odłamka w cel (*ES – expose site* – narażone miejsce) znajdujący się w ustalonej odległości jest zdeterminowane przez powierzchnię gęstość strumienia odłamków przechodzących przez powierzchnię celu w płaszczyźnie prostopadłej do trajektorii lotu odłamka w miejscu uderzenia. Jeśli brany jest pod uwagę wpływ grawitacji, to do obliczenia trajektorii lotu odłamka muszą być wykorzystane metody numeryczne, nawet jeżeli zostaną przyjęte założenia upraszczające w odniesieniu do oporu powietrza i rozkładu masy odłamków. Jeżeli jednak grawitacja zostanie pominięta, to do relacji gęstości strumienia odłamków i odległości ma zastosowanie prawo odwrotności kwadratu odległości.

Jeżeli założy się, że:

- rozkład masy odłamków opisuje wzór Motta,
 - masy odłamków są większe niż ustalona masa M_f ,
 - powierzchnia celu jest prostopadła w stosunku do trajektorii odłamka w odległości R ,
- to gęstość powierzchniową odłamków q_f z pojedynczego egzemplarza amunicji opisuje wzór

$$q_f = \frac{Q_0}{R^2} e^{-\sqrt{\frac{2M_f}{M_0}}} \left[\frac{1}{m^2} \right] \quad (15)$$

gdzie: Q_0 – oznacza ilość odłamków wyrzuconą w kącie jednostkowym.

Rzeczywiste wielkości Q_0 , oznaczone przez $Q_{0,eff}$, zależą od warunków, w jakich przechowywana jest amunicja (rodzaj magazynu). Rzeczywista liczba odłamków ze stosu amunicji jest obliczana jako iloczyn liczby odłamków z pojedynczego egzemplarza amunicji i efektywnej ilości amunicji w stosie N_E

$$Q_{0,eff} = Q_0 \cdot N_E \quad (16)$$

Dla stosu amunicji bez schronu (ustawionego na otwartej przestrzeni) N_E określa się w sposób następujący

$$N_E = 0,9 \cdot N_S + 0,1 \cdot N_T \quad (17)$$

Dla stosu w magazynie przykrytym ziemią, N_E oblicza się ze wzoru

$$N_E = 0,7 \cdot N_S + 0,1 \cdot N_T \quad (18)$$

gdzie: N_E – efektywna ilość amunicji w stosie; N_S – ilość amunicji w stosie od strony potencjalnego celu; N_T – ilość amunicji w wierzchniej warstwie stosu.

Prawdopodobieństwo trafienia P_f przez pojedynczy odłamek bądź strumień odłamków jest obliczane przy użyciu gęstości powierzchniowej q_f . Przyjmuje się, że uderzenie w otoczenie danego punktu powierzchni celu jest jednakowo prawdopodobne. Prawdopodobieństwo trafienia P_f przez jeden bądź kilka odłamków o masie M_f lub większej, w daną powierzchnię celu określa następujący wzór

$$P_f = 1 - e^{-q_f A_T} \quad (19)$$

gdzie: A_T – powierzchnia celu [m^2]. Przykładowo, dla człowieka stojącego frontem do wybuchu $A_T \approx 0,56 m^2$.

Poziomy zagrożenia odłamkiem dla danego celu określone są z wykorzystaniem następujących parametrów:

- gęstość odłamków na powierzchni celu lub prawdopodobieństwo trafienia pojedynczego odłamku lub strumienia odłamków w cel,
- energia uderzenia – energia kinetyczna pojedynczego odłamka, wzór (13),
- impuls uderzenia (pęd) pojedynczego odłamka, wzór (14).

Jako kryteria uszkodzeń powodowanych przez odłamki proponowane są różne wielkości zależne od prędkości w chwili uderzenia i masy odłamka. W krajach NATO śmiertelność dla człowieka odłamek jest definiowany jako odłamek z energią kinetyczną przewyższającą wartość krytyczną 79 J. Tę wartość graniczną stosuje się do odłamków o masie sięgającej od kilku gramów do kilkunastu kilogramów. W tabeli 8 przedstawiono zależność prawdopodobieństwa śmierci po obrażeniach spowodowanych odłamkami od energii odłamków w chwili uderzenia i miejsca trafienia.

Tab. 8. Prawdopodobieństwo śmierci w zależności od energii kinetycznej odłamka i miejsca uderzenia [5]

Prawdopodobieństwo śmierci [%]	Energia kinetyczna odłamka w chwili uderzenia [J]			
	głowa	klatka piersiowa	brzuch	kończyny
1	55	58	105	155
5	65	90	140	240
20	79	140	200	380
50	100	230	280	620
99	200	850	850	2500

Aktualnie przyjmuje się, że krytyczne parametry dla uderzenia odłamkami w przypadku człowieka są następujące:

- gęstość masowa odłamków 1 odłamek/56 m² (powierzchnia stojącego frontem do wybuchu człowieka to 0,56 m²),
- energia uderzenia 79 J.

2.3. Propozycja metody wyznaczenie maksymalnego zasięgu dla odłamków

W zaproponowanej metodzie, analogicznie jak w procedurze przedstawionej w normie [5], wyznacza się wartość parametru rozkładu masy odłamków M_A według wzoru (1). Następnie ustala się całkowitą liczbę odłamków według wzoru (4). Masę najlżejszego niebezpiecznego odłamka wyznacza się ze wzorów (5) lub (6) w zależności od wybranego poziomu bezpieczeństwa. Podstawiając otrzymane dane do wzoru (7) oblicza się liczbę odłamków o masie nie mniejszej niż M_d .

Do obliczenia zasięgu odłamków niezbędne jest obliczenie prędkości początkowej odłamków. Oblicza się ją z postaci ogólnej wzoru Gurneya – wzór (9) dla $n = 2$. Maksymalny promień rozrzutu odłamków R_M można uzyskać stosując wzór na rzut ukośny. Bez uwzględniania oporów powietrza i przyjęciu kąta rzutu odłamka 45°, zasięg ten określa wzór

$$R_M = \frac{V_0^2}{g} \quad [m] \quad (20)$$

Pominięcie oporu powietrza powoduje, że kształt i masa odłamka nie ma wpływu na jego maksymalny zasięg. Jednak uzyskane wartości R_M są nierzeczywiste w przypadku prędkości początkowych uzyskiwanych przez odłamki po rozerwaniu skorupy pocisku.

Chcąc uwzględnić siły oporu powietrza w pracy [7] zebrano w formie wykresów wyniki symulacji komputerowej promieni rozrzutu fragmentów pocisków o różnej masie i kształcie. Wyniki przedstawiono w formie zależności bezwymiarowego promienia zasięgu R_b

$$R_b = \frac{\rho C_D A_f R_{max}}{M_d} \quad (21)$$

od bezwymiarowej prędkości początkowej V_b

$$V_b = \frac{\rho C_D A_f V_0^2}{M_d g} \quad (22)$$

Korzystanie z tej zależności w formie graficznej jest obarczone dużym błędem. Dlatego też autorzy niniejszej pracy zamienili wykres na funkcję w postaci dyskretnej wykorzystując programy graficzne SigmaScan i SigmaPlot. Następnie funkcję tę aproksymowano i otrzymano następujące wzory łączące bezwymiarowy zasięg z bezwymiarową prędkością

$$R_b = \begin{cases} 1211,693(1 - e^{-8,3824 \cdot 10^{-4} V_b}) & \text{dla } V_b \leq 0,25 \\ 36,036 - \frac{35,978}{(1+0,5408V_b)^{0,046}} & \text{dla } V_b > 0,25 \end{cases} \quad (23)$$

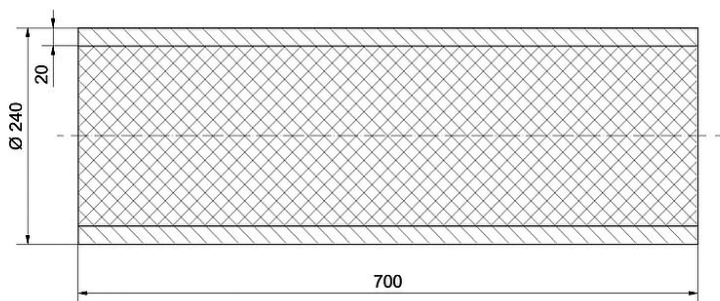
Po wyznaczeniu bezwymiarowego zasięgu odłamków rzeczywisty zasięg odłamków może być obliczony ze wzoru

$$R_{max} = \frac{M_d R_b}{\rho C_D A_f} \quad [m] \quad (24)$$

3. Przykłady obliczania stref zagrożenia i maksymalnego zasięgu odłamków

3.1. Obliczenia stref niebezpiecznych dla pojedynczej jednostki amunicji

Do obliczeń został przyjęty modelowy pocisk przedstawiony na rys. 1, przybliżający amunicję o kalibrze 240 mm. Skorupa wykonana ze stali o gęstości 7850 kg/m^3 , promieniu wewnętrznym 10 cm, grubości 2 cm i długości 70 cm, wypełniona jest trotylem o gęstości 1610 kg/m^3 i prędkości Gurneya $V_G = 2438 \text{ m/s}$ [5]. Dla trotylu stała Motta $B_x = 3,815 \text{ kg}^{1/2}\text{m}^{-7/6}$ a gęstość balistyczna dla stalowej otoczki $k = 4270 \text{ kg/m}^3$ [5]. Przyjęto, że odłamki są nieregularne i współczynnik oporu powietrza $C_D = 1,2$ [5]. Stała geometryczna we wzorze Gurneya $n = 2$. Przyjęto, że powierzchnia celu $A_T = 0,56 \text{ m}^2$, a energia krytyczna $E_{cr} = 79 \text{ J}$ [5].



Rys. 1. Modelowy pocisk – materiał wybuchowy w skorupie stalowej

Obliczenie odległości strefy niebezpiecznej ze względu na odłamki wykonano według procedury opisanej w punkcie 2.2. Wszystkie obliczenia wykonano z wykorzystaniem arkusza kalkulacyjnego Microsoft Office Excel.

1. Obliczenie prędkości początkowej odłamków według wzoru (9)

- masa stalowej skorupy: $M_c = 75,957 \text{ [kg]}$
- masa trotylu: $m = 35,4 \text{ [kg]}$
- prędkość odłamków: $V_0 = 1514 \text{ [m/s]}$

2. Obliczenie całkowitej liczby odłamków N_t ze wzoru (4) oraz liczby odłamków wyrzucanych w kąt jednostkowy Q_0

$$N_t = 5619$$

$$Q_0 = \frac{N_t}{4\pi}$$

$$Q_0 = 447$$

3. Wyznaczenie średniej masy odłamków M_0

$$M_0 = \frac{M_c}{N_t}$$

$$M_0 = 0,0135 \text{ [kg]}$$

4. Wyznaczenie parametru rozkładu masy odłamka M_A

Parametr rozkładu masy odłamków M_A wyznacza się ze wzoru (1).

- grubość stalowej skorupy: $t_c = 0,02 \text{ [m]}$
- średnica wewnętrzna skorupy: $d_i = 0,1 \text{ [m]}$
- stała charakterystyczna trotylu: $B_x = 3,329 \left[\frac{\sqrt{\text{kg}}}{\text{m}^{7/6}} \right]$

$$M_A = 0,0822 \left[\sqrt{\text{kg}} \right]$$

5. Wyznaczenie masy najbliższego niebezpiecznego odłamka M_f

W celu wyznaczenia masy M_f należy znaleźć masę odłamka, którego energia kinetyczna w zadanej odległości jest równa energii krytycznej. Masę M_f określano według następującego algorytmu:

- jeżeli końcowa energia odłamka w spadku swobodnym jest mniejsza niż energia krytyczna (na przykład $E_{cr} = 79$ J dla człowieka) masę M_f wyznacza się z układu równań

$$M_f = 2 \cdot \frac{E_{cr}}{V_i^2} \quad [\text{kg}] \quad (25)$$

$$V_i = V_0 e^{-\frac{R}{L}} \quad \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] \quad (26)$$

gdzie: $L = \frac{2 \cdot \sqrt[3]{k^2 \cdot M_f}}{c_D \cdot r \cdot \rho} \quad [\text{m}]$

- jeżeli końcowa energia odłamka w swobodnym spadku jest większa niż energia krytyczna, to masę M_f wyznacza się z równania

$$M_f = \left(\frac{2 \cdot E_{cr}}{g L_1} \right)^{\frac{3}{4}} \quad [\text{kg}] \quad (27)$$

gdzie: $L_1 = \frac{2 \cdot \sqrt[3]{k^2}}{c_D \cdot r \cdot \rho}$

W pierwszym przypadku układ równań sprowadza się do równania nieliniowego ze względu na M_f

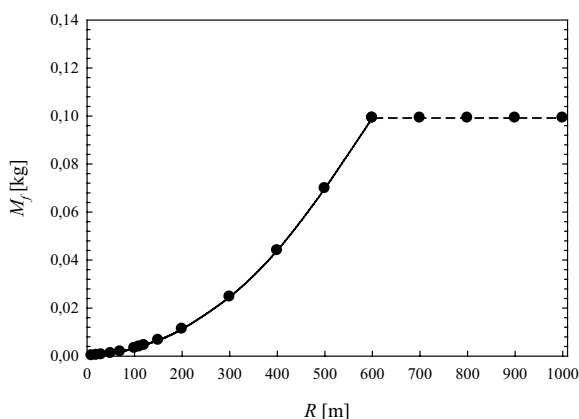
$$M_f - 2 \frac{E_{cr}}{V_i^2} = 0 \quad (28)$$

przy czym V_i jest funkcją M_f .

Do rozwiązania zastosowano metodę siecznych. Masy najbliższych niebezpiecznych odłamków dla wybranych odległości $R = 30, 50, 70, 100, 110, 120, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000$ m zostały zestawione w tabeli 9. Wykres zależności M_f od R pokazano na rys. 2.

Tab. 9. Masa najbliższego niebezpiecznego odłamka M_f dla danej odległości R

R [m]	M_f [kg]	R [m]	M_f [kg]
30	0,00056	150	0,00662
50	0,00110	200	0,01123
70	0,00182	300	0,02462
100	0,00328	400	0,04398
110	0,00385	500	0,06982
120	0,00448	600 ÷ 1000	0,09916



Rys. 2. Zależność masy najbliższego niebezpiecznego odłamka M_f od odległości R

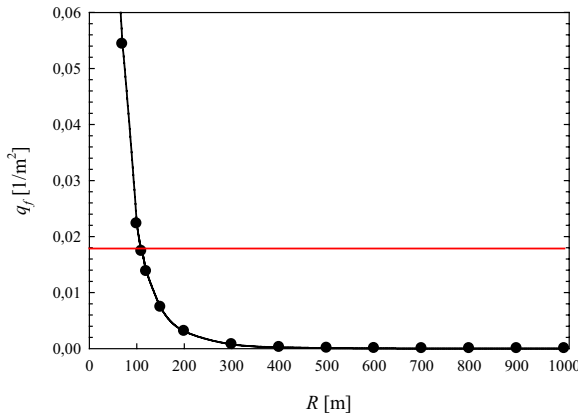
Dla $R \geq 600$, energia odłamków w swobodnym spadku jest większa od energii krytycznej i masa najbliższego odłamka M_f nie zależy od odległości.

6. Obliczenie gęstości strumienia odłamków q_f .

Gęstość strumienia odłamków obliczono według wzoru (15). Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 10. Wykres zależności gęstości strumienia niebezpiecznych odłamków q_f od odległości R pokazano na rys. 3. Poziomą linią zaznaczono wartość gęstości krytycznej strumienia odłamków $q_{cr} = 1/56 \text{ 1/m}^2 = 0,0179 \text{ 1/m}^2$.

Tab. 10. Gęstości strumienia odłamków q_f dla przyjętych odległości R

R [m]	q_f [1/m ²]	R [m]	q_f [1/m ²]	R [m]	q_f [1/m ²]
30	$3,731 \cdot 10^{-1}$	150	$7,39 \cdot 10^{-3}$	700	$1,98 \cdot 10^{-5}$
50	$1,196 \cdot 10^{-1}$	200	$3,08 \cdot 10^{-3}$	800	$1,52 \cdot 10^{-5}$
70	$5,43 \cdot 10^{-2}$	300	$7,37 \cdot 10^{-4}$	900	$1,20 \cdot 10^{-5}$
100	$2,28 \cdot 10^{-2}$	400	$2,18 \cdot 10^{-4}$	1000	$9,70 \cdot 10^{-6}$
110	$1,74 \cdot 10^{-2}$	500	$7,19 \cdot 10^{-5}$		
120	$1,38 \cdot 10^{-2}$	600	$2,70 \cdot 10^{-5}$		



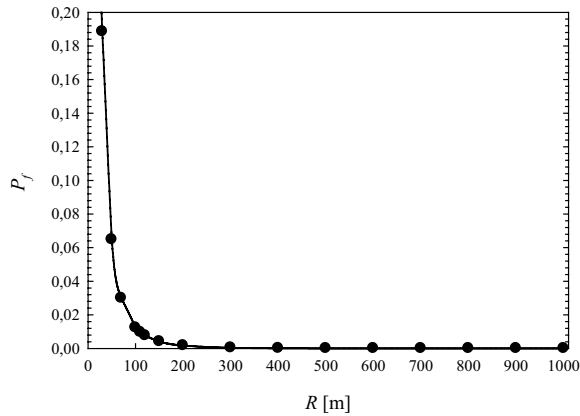
Rys. 3. Zależność gęstości strumienia niebezpiecznych odłamków q_f od odległości R

7. Wyznaczenie prawdopodobieństwa trafienia P_f .

Prawdopodobieństwo trafienia wyznaczono ze wzoru (19). Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 11. Na rys. 4 pokazano zależność prawdopodobieństwa trafienia celu P_f od odległości R .

Tab. 11. Prawdopodobieństwo trafienia celu P_f dla danej odległości R

R [m]	P_f	R [m]	P_f	R [m]	P_f
30	$18,85 \cdot 10^{-2}$	150	$4,1 \cdot 10^{-3}$	700	$0,111 \cdot 10^{-6}$
50	$6,48 \cdot 10^{-2}$	200	$1,7 \cdot 10^{-3}$	800	$8,49 \cdot 10^{-6}$
70	$2,99 \cdot 10^{-2}$	300	$4,12 \cdot 10^{-4}$	900	$6,71 \cdot 10^{-6}$
100	$1,24 \cdot 10^{-2}$	400	$1,22 \cdot 10^{-4}$	1000	$5,43 \cdot 10^{-6}$
110	$0,97 \cdot 10^{-2}$	500	$4,03 \cdot 10^{-5}$		
120	$0,77 \cdot 10^{-2}$	600	$1,51 \cdot 10^{-5}$		



Rys. 4. Zależność prawdopodobieństwa trafienia celu P_f od odległości R

8. Wyznaczenie stref bezpieczeństwa.

Według przeprowadzonych obliczeń, dla odłamków o energii kinetycznej $E_{kin} = 79$ J gęstość strumienia odłamków q_f jest mniejsza od gęstości krytycznej odłamków $q_{cr} = 1/56$ 1/m² na odległości 110 m od miejsca wybuchu. Biorąc pod uwagę kryterium energii krytycznej i krytycznej gęstości strumienia odłamków można przyjąć, że odległość 110 m od miejsca wybuchu będzie bezpieczna dla człowieka. Alternatywnym kryterium, które może być przyjęte do obliczenia stref rażenia odłamkami, przedstawionym w STANAG 4440 jest poziom bezpieczeństwa C_L . Wielkość $(1-C_L)$ oznacza udział odłamków o masie równej lub większej od przyjętej masy M_d w całkowitej liczbie odłamków. Obliczenia zaczyna się od wyznaczenia rozkładu masy odłamków M_d i całkowitej masy odłamków M_c . Sposób ich wyznaczenia został już przedstawiony. Następnie oblicza się masę najbliższego niebezpiecznego odłamka M_d ze wzoru (5) lub (6) w zależności od przyjętego poziomu bezpieczeństwa C_L . Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 12.

Tab. 12. Masa najbliższego niebezpiecznego odłamka M_d w zależności od przyjętego poziomu bezpieczeństwa

C_L	M_d [kg]	C_L	M_d [kg]
0,95	0,0607	0,98	0,1034
0,96	0,0700	0,99	0,1433
0,97	0,0831		

Następnie wyznacza się odległość R ze wzoru (13) przy założeniu, że energia kinetyczna odłamka równa się energii krytycznej $E_{cr} = 79$ J. W tabeli 13 przedstawiono odległości R , na jakie miotane są odłamki o masie równej lub większej od M_d i energii kinetycznej $E_{kin} \geq 79$ J.

Tab. 13. Masy i odległości R dla najbliższych niebezpiecznych odłamków M_d , prawdopodobieństwo trafienia P_f w zależności od przyjętego poziomu bezpieczeństwa

C_L	M_d [kg]	R [m]	P_f
0,95	0,0607	467	$5,73 \cdot 10^{-5}$
0,96	0,0700	501	$3,99 \cdot 10^{-5}$
0,97	0,0831	543	$2,55 \cdot 10^{-5}$
0,98	0,1034	602	$1,38 \cdot 10^{-5}$
0,99	0,1433	701	$5,09 \cdot 10^{-6}$

Z danych zawartych w tabeli 13 wynika, że prawdopodobieństwo trafienia niebezpiecznym odłamkiem przy przyjętych poziomach bezpieczeństwa jest o 2-3 rzędy wielkości mniejsze niż prawdopodobieństwo trafienia na odległości 110 m obliczone dla krytycznych energii i gęstości odłamków (tabela 11).

Maksymalny zasięg odłamków obliczono według procedury opisanej w punkcie 2.3. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 14.

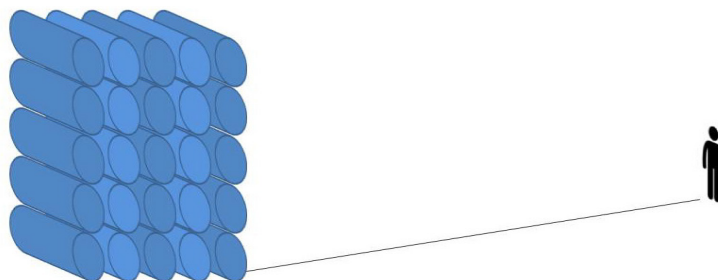
Tab. 14. Masa najłżejszego niebezpiecznego odłamka M_d , ilość odłamków N_d cięższych od najłżejszego niebezpiecznego odłamka i maksymalny zasięg R_{max} w zależności od przyjętego poziomu bezpieczeństwa C_L

C_L	M_d [kg]	N_d	R_{max} [m]
0,95	0,0607	280	729
0,96	0,0700	224	761
0,97	0,0831	168	800
0,98	0,1034	112	854
0,99	0,1433	56	940
0,999	0,3225	5	1193

Jak należało oczekiwać, dla takiego samego poziomu bezpieczeństwa zasięg maksymalny odłamków jest większy niż podany w tabeli 13, ponieważ przy jego obliczaniu nie uwzględnia się dodatkowego kryterium energii krytycznej dla człowieka.

3.2. Obliczenia stref niebezpiecznych dla odkrytego stosu amunicji

W modelowym składzie amunicji został przyjęty do obliczeń ładunek opisany w punkcie 3.1. Ułożenie amunicji w stosie oraz położenie celu względem stosu przedstawiono na rys. 5. Cel znajduje się w kierunku prostopadłym do osi ładunków.



Rys. 5. Ułożenie amunicji w stosie i położenie celu względem stosu

Obliczenia dla składu amunicji są podobne do obliczeń dla pojedynczego ładunku. Jedyną różnicą jest przyjęcie, zgodnie z normą [5], dwukrotnie większej prędkości początkowej odłamków, obliczenie efektywnej ilości amunicji w stosie N_E ze wzoru (17) oraz efektywnej ilości odłamków miotanych w stronę celu w kąt jednostkowy $Q_{0,eff}$ ze wzoru (16). Procedura obliczeń jest taka sama jak dla pojedynczej jednostki amunicji. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 15.

Tab. 15. Masa najłżejszego niebezpiecznego odłamka M_f dla danej odległości R

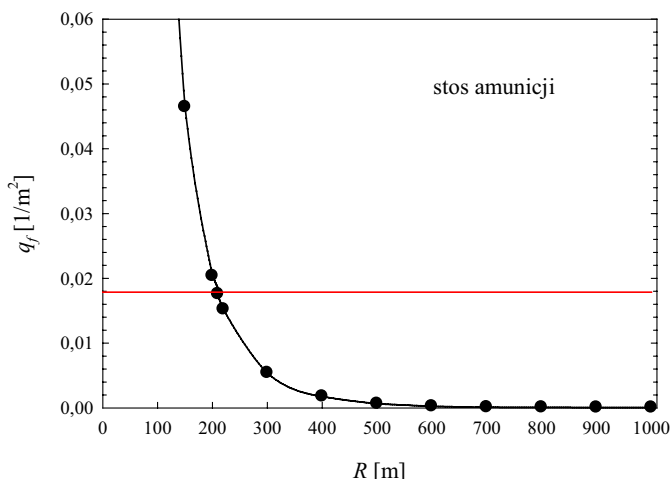
R [m]	M_f [kg]	R [m]	M_f [kg]	R [m]	M_f [kg]
50	0,00055	210	0,00759	600	0,06978
70	0,00097	220	0,00834	700	0,09818
100	0,00183	300	0,01577	≥800	0,09916
150	0,00391	400	0,02893		
200	0,00689	500	0,04681		

Na odległości większej od 700 m energia odłamków w swobodnym spadku jest większa od energii krytycznej i masa najłżejszego odłamka M_f nie zależy od odległości.

Wyniki obliczeń gęstości strumienia odłamków q_f przedstawiono w tabeli 16. Na rys. 6 przedstawiono zależność gęstości strumienia odłamków q_f od odległości R . Poziomą linią zaznaczono krytyczną gęstość strumienia odłamków $q_{cr} = 1/56 \text{ 1/m}^2$. Wyniki obliczeń prawdopodobieństwa trafienia przedstawiono w tabeli 17.

Tab. 16. Gęstości strumienia odłamków q_f dla przyjętych odległości R

R [m]	q_f [1/m ²]	R [m]	q_f [1/m ²]	R [m]	q_f [1/m ²]
50	0,6718	210	0,0176	600	$2,50 \cdot 10^{-4}$
70	0,3124	220	0,0152	700	$1,01 \cdot 10^{-4}$
100	0,1330	300	$5,39 \cdot 10^{-3}$	800	$7,58 \cdot 10^{-5}$
150	0,0464	400	$1,77 \cdot 10^{-3}$	900	$5,99 \cdot 10^{-5}$
200	0,0204	500	$6,43 \cdot 10^{-4}$	1000	$4,85 \cdot 10^{-5}$



Rys. 6. Zależność gęstości strumienia odłamków q_f od odległości R dla stosu amunicji

Tab. 17. Prawdopodobieństwo trafienia celu P_f w dla wybranych odległości R

R [m]	P_f	R [m]	P_f	R [m]	P_f
50	$31,35 \cdot 10^{-2}$	210	$9,79 \cdot 10^{-3}$	600	$1,40 \cdot 10^{-4}$
70	$16,05 \cdot 10^{-2}$	220	$8,48 \cdot 10^{-3}$	700	$5,65 \cdot 10^{-5}$
100	$7,18 \cdot 10^{-2}$	300	$3,02 \cdot 10^{-3}$	800	$4,25 \cdot 10^{-5}$
150	$2,57 \cdot 10^{-2}$	400	$9,88 \cdot 10^{-4}$	900	$3,36 \cdot 10^{-5}$
200	$1,13 \cdot 10^{-2}$	500	$3,60 \cdot 10^{-4}$	1000	$2,71 \cdot 10^{-5}$

Odległość, na której spełnione jest kryterium energii krytycznej i krytycznej gęstości odłamków dla odkrytego składu amunicji wynosi 210 m. Prawdopodobieństwo trafienia przez odłamek na tej odległości wynosi 0,98%. Można uznać, że odległość 210 m powinna być bezpieczna dla ludzi zgodnie z kryterium podanym w [5].

Wyznaczenia stref zasięgu niebezpiecznych odłamków dla stosu amunicji dokonano przyjmując za kryterium poziomy bezpieczeństwa takie same jak dla pojedynczej jednostki amunicji. Jednakże w tym przypadku podwojono prędkości początkowe odłamków [5].

Odległości R , na jakie miotane są odłamki o masie równej lub większej od M_d i energii kinetycznej $E_{kin} = 79 \text{ J}$ dla przyjętego poziomu bezpieczeństwa C_L dla stosu amunicji przedstawiono w tabeli 18.

Tab. 18. Masy i odległości R dla najbliższych niebezpiecznych odłamków M_d , prawdopodobieństwo trafienia P_f w zależności od przyjętego poziomu bezpieczeństwa

C_L	M_d [kg]	R [m]	P_f
0,95	0,0607	563	$1,98 \cdot 10^{-4}$
0,96	0,0700	601	$1,39 \cdot 10^{-4}$
0,97	0,0831	649	$8,91 \cdot 10^{-5}$
0,98	0,1034	717	$4,88 \cdot 10^{-5}$
0,99	0,1433	829	$1,82 \cdot 10^{-5}$

Z danych zawartych w tabeli 18 wynika, że prawdopodobieństwo trafienia niebezpiecznym odłamkiem przy przyjętych poziomach bezpieczeństwa (odpowiadające im odległości podane są również w tabeli 18) jest o 1-2 rzędy wielkości mniejsze niż prawdopodobieństwo trafienia na odległości 210 m obliczone dla krytycznych energii i gęstości odłamków (tabela 17).

Procedura wyznaczenia maksymalnego zasięgu odłamków dla odkrytego stosu amunicji była taka sama jak w przypadku pojedynczej jednostki amunicji. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 19.

Tab. 19. Masy najbliższych niebezpiecznych odłamków M_d , ilość odłamków $N_{d,eff}$ cięższych od najbliższego niebezpiecznego odłamka i odległości maksymalne R_{max} w zależności od wybranego poziomu bezpieczeństwa C_L

C_L	M_d [kg]	$N_{d,eff}$	R_{max} [m]
0,95	0,0607	1400	837
0,96	0,0700	1120	875
0,97	0,0831	840	921
0,98	0,1034	560	984
0,99	0,1433	280	1086
0,999	0,3225	25	1387

3.3. Analiza wyników obliczeń i określenie stref zagrożenia dla ludzi

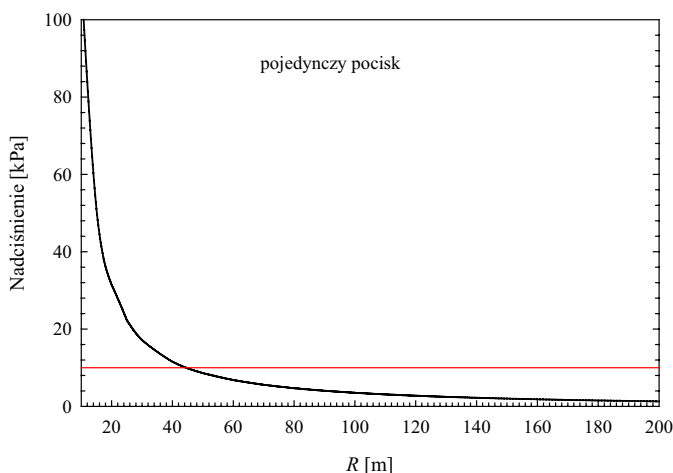
W normie [5] przyjęto, że w odległości bezpiecznej dla człowieka gęstość strumienia odłamków o energii kinetycznej większej lub równej 79 J nie może przekraczać wielkości krytycznej gęstości strumienia $q_{cr} = 1/56 \text{ l/m}^2$ (prawdopodobieństwo trafienia odłamkiem wynosi wtedy 0,98%). Z analizy rezultatów wykonanych obliczeń wynika, że dla pojedynczej amunicji te dwa kryteria są spełnione jednocześnie na odległości 110 m. Odległość ta wydaje się mała biorąc pod uwagę fakt detonacji ładunku trotylu o masie $m = 36 \text{ kg}$ (przybliżona masa trotylu w skorupie). Nasuwa się pytanie, czy na tej odległości większym zagrożeniem nie będzie fala podmuchowa. W celu odpowiedzi na to pytanie obliczono wartości amplitudy nadciśnienia P_s w fali podmuchowej generowanej w powietrzu po wybuchu ładunku trotylu o masie 36 kg na powierzchni ziemi. Wykorzystano wzory aproksymacyjne dla modelu Kindery-Bulmash podane w pracy [8]

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

gdzie Z oznacza tzw. zredukowaną odległość, wyznaczaną ze wzoru

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{m}} \quad (30)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Zależność nadciśnienia na czole fali podmuchowej od odległości dla pojedynczego pocisku z trotylem

Jak wynika z rys. 7, spadek nadciśnienia fali podmuchowej jest bardzo szybki. Zakładając, że graniczna wartość ciśnienia niebezpiecznego dla człowieka wynosi 10 kPa [8], można przyjąć, że fala podmuchowa nie jest groźna już na odległości 50 m. Zatem w odległości 110 m bardziej niebezpiecznym zagrożeniem dla człowieka są odłamki.

Jednakże należy pamiętać, że odległość 110 m nie gwarantuje 100% pewności, że człowiek znajdujący się na tej odległości nie zostanie trafiony odłamkiem, ponieważ obliczone prawdopodobieństwo trafienia wynosi 0,98%. Może się wydawać, że zajście takiego zdarzenia jest mało prawdopodobne. Jednak zakładając, że na takiej odległości może znajdować się 100 osób oznacza to, że jedna z nich może zostać trafiona odłamkiem o masie równej lub większej od 3,9 g (tabela 9). Jeżeli taki odłamek na odległości 110 m trafi człowieka w głowę prawdopodobieństwo jego śmierci będzie wynosiło 20% (tabela 8).

Alternatywnym kryterium dla gęstości strumienia niebezpiecznych odłamków jest poziom bezpieczeństwa C_L . W zależności od wartości przyjętego poziomu bezpieczeństwa otrzymuje się odległości R , na których prawdopodobieństwo trafienia P_T jest bardzo małe, ale różne od zera (od $5,7 \cdot 10^{-5}$ do $5,1 \cdot 10^{-6}$ – tabela 13). Wybór poziomu bezpieczeństwa zależy od oceniającego zagrożenie odłamkami.

Maksymalna odległość na jaką miotane są niebezpieczne odłamki z pocisku 240 mm dla poziomu bezpieczeństwa $C_L = 0,999$ wynosi 1193 m. Masa tych odłamków jest równa lub większa od 322 g i jest ich nie więcej niż 5. W dalszej odległości nie istnieje już zagrożenie odłamkami.

Według danych zawartych w tabeli 1, pochodzących z instrukcji [2] odległość bezpieczna odpowiada promieniowi rozrzutu odłamków i dla wybuchu amunicji o kalibrze 240 mm wynosi 1500 m. Wartość ta zdecydowanie przekracza strefę bezpieczną dla człowieka określoną zgodnie z procedurą podaną w normie [5]. Natomiast dobrze koreluje z wynikiem obliczeń maksymalnego zasięgu niebezpiecznych odłamków dla poziomu bezpieczeństwa 0,999. W instrukcji [2] do wyznaczenia bezpiecznej odległości ze względu na odłamki przyjęto kryterium maksymalnego zasięgu odłamków, nie biorąc pod uwagę energii odłamków i gęstości strumienia odłamków oraz prawdopodobieństwa trafienia jak w normie [5].

Obliczona bezpieczna odległość dla stosu amunicji, na której spełnione jest jednocześnie kryterium energii kinetycznej i gęstości strumienia odłamków wynosi 210 m (tabela 17). W tym przypadku również sprawdzono czy fala podmuchowa na odległości 210 m jest niebezpieczna dla człowieka. Uwzględniono całą masę trotylu z amunicji w stosie (900 kg). Z obliczeń wynika, że w tym przypadku ciśnienie fali podmuchowej spadło poniżej granicznej wielkości ciśnienia niebezpiecznego dla człowieka na odległości około 130 m.

Na granicy strefy zagrożenia wynoszącej 210 m masa najbliższego niebezpiecznego odłamka równa się 7,6 g. W stosunku do detonacji pojedynczego pocisku odległość ta i masa pocisku są prawie dwa razy większe. Przyjmując za kryterium poziom bezpieczeństwa C_L z obliczeń wynika, że dla danego poziomu bezpieczeństwa

C_L odległości, na jaką miotane są niebezpieczne odłamki o energii kinetycznej $E_{kin} = 79$ J powstające po detonacji stosu amunicji są o 20% większe od odległości dla odłamków tworzących się w czasie detonacji pojedynczego pocisku (tabele 12 i 18).

Maksymalne odległości miotanych odłamków pochodzących z detonacji stosu amunicji są o około 15% większe od maksymalnych odległości odłamków tworzących się w przypadku detonacji pojedynczej jednostki i stosu amunicji (tabele 13 i 19). Według przedstawionych obliczeń maksymalna odległość na jaką miotane są odłamki zmienia się niewiele w obu przypadkach.

W rozporządzeniu ministra gospodarki odległość od zagrożonych obiektów, w pobliżu których może znajdować się magazyn bazowy zależy od gęstości zaludnienia danego obszaru. Według danych z tabeli 4, magazyn bazowy amunicji może znajdować się w odległości przynajmniej 275 m od obszaru zabudowy zwartej i rozproszonej lub drogi o dużym natężeniu ruchu. Odległość ta wzrasta do 400 m, jeżeli w okolicach magazynu są obiekty użyteczności publicznej, takie jak szpital czy placówka oświatowo-wychowawcza. Jest to spowodowane tym, że zwiększenie gęstości zaludnienia powoduje powiększenie powierzchni potencjalnego celu. Im powierzchnia celu jest większa tym większe jest prawdopodobieństwo trafienia.

Z obliczeń dla stosu amunicji (900 kg trotylu) wynika, że kryteria energii kinetycznej i gęstości strumienia odłamków są jednocześnie spełnione na odległości 210 m. Porównując otrzymany wynik obliczeń z danymi zamieszczonymi w tabeli 4 można stwierdzić, że obliczona odległość jest zbliżona do odległości na jakiej może znajdować się magazyn od drogi o dużym natężeniu ruchu lub zabudowy zwartej i rozproszonej.

4. Podsumowanie

Procedura określania stref zagrożenia odłamkami dla ludzi opisana w normie [5] jest skomplikowana i jej zastosowanie wymaga dużej wiedzy z zakresu fizyki wybuchu. W szczególności zastosowanie jako kryterium poziomu bezpieczeństwa C_L wymaga przyjęcia specyficznych założeń i daje w konsekwencji niejednoznaczne wyniki. Podane w polskich przepisach wielkości stref bezpieczeństwa wokół magazynów oraz pojedynczej amunicji dobrze korelują z wynikami uzyskanymi z obliczeń według procedury zawartej w normie [5] i własnej procedury wyznaczania zasięgu maksymalnego odłamków. Wydaje się więc, że implementowanie normy NATO w chwili obecnej nie jest uzasadnione. Zaproponowana tam metodyka może być jednak wykorzystana do weryfikacji i uszczegółowienia przepisów obowiązujących w Polsce.

Literatura

- [1] Cudziło Stanisław, Maranda Andrzej, Nowaczewski Jerzy, Trębiński Radosław, Trzciński A. Waldemar. 2000. *Wojskowe materiały wybuchowe*. Częstochowa : Wyd. Wydziału Metalurgii i Inżynierii Materiałowej Politechniki Częstochowskiej, ISBN 83-87745-50-2.
- [2] *Prace minerskie i niszczenia*. 1995. Warszawa : Sztab Generalny WP.
- [3] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 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. 2010 nr 222 poz. 1451.
- [4] *Zrestrukturizowana Umowa ADR*. Dz. U. 2015 poz. 882.
- [5] *AASTP-I Manual of NATO safety principles for the storage of military ammunition and explosives*. NATO International Staff – Defense Investment Division, 2010.
- [6] Drake L. James, Twisdale A. Lawrence, Frank A. Robert, Dass C. William, Rochefort A. Michael, Walker E. Robert, Britt R. James, Murphy E. Charles, Slawson R. Thomas, Sues H. Robert. 1989. *Protective construction design manual*. USA : Tyndall Air Force Base, Report No. ESL-TR-87-57.
- [7] Baker E. Wilfred, Cox P.A., Westine P.S., Kulesz J. James, Strehlow A. Roger. 1983. *Explosion Hazards and Evaluation*. Amsterdam : Elsevier, ISBN 978-0-444-42094-7.
- [8] Trzciński A. Waldemar. 2016. „Przegląd metod obliczania parametrów fal podmuchowych”. *Problemy Mechatroniki* 7 (1) : 61-78.