



Wpływ umiejscowienia ładunku wybuchowego na intensywność fali podmuchowej

ROBERT PANOWICZ, WIESŁAW BARNAT

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechaniczny, Katedra Mechaniki
i Informatyki Stosowanej, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań nad rozprzestrzenianiem się fali podmuchowej pochodzącej od wybuchu 2,5 kg ładunku trotylu. Rozpatrzono najczęściej spotykane przypadki umiejscowienia ładunku w stosunku do powierzchni gruntu: na powierzchni, równo z powierzchnią, 5 i 10 cm pod powierzchnią gruntu. Do opisu procesu detonacji wykorzystano przybliżenie optyki detonacyjnej, a zachowanie się produktów detonacji opisano równaniem JWL. Zachowanie się elementów modelu opisano za pomocą równań mechaniki ośrodków ciągłych w ujęciu Eulera. Badano wpływ związku konstytutywnego opisującego zachowanie się gruntu na intensywność fali podmuchowej. Praca ma charakter aplikacyjny do badań nad bezpieczeństwem załóg znajdujących się w lekkich patrolowych pojazdach opancerzonych.

Słowa kluczowe: metoda elementów skończonych, model konstytutywny gruntu, fala podmuchowa
Symbole UKD: 534.222.2

1. Wstęp

Udział Wojska Polskiego w działaniach operacyjnych poza granicami naszego kraju spowodował, iż żołnierze spotkali się z nowym rodzajem zagrożeń w postaci IED (ang. *improvised explosive devices*, improwizowanych ładunków wybuchowych). Ładunki takie wyrabia się z dostępnych materiałów wybuchowych (głównie trotylu) metodami chałupniczymi. Odpalenie takich ładunków następuje poprzez proste, nierzadko pomysłowo wykonane detonatory. W Iraku IED umieszczane są w pobliżu tras przejazdów, a w Afganistanie ukrywa się je pod powierzchnią drogi.

Podczas detonacji ładunku generuje się fala podmuchowa, będąca główną przyczyną zniszczenia konstrukcji pojazdów. Różnorakie umiejscowienie ładunku

w stosunku do powierzchni gruntu, którego gęstość jest znacznie większa od gęstości powietrza, powoduje zmiany w propagacji fali podmuchowej od wzmocnienia do osłabienia. Problem ten, opisany w dostępnej literaturze [1, 2], pobudził zainteresowanie powyższym tematem.

Zachowanie się fizycznego układu, w którym dochodzi do gwałtownego wydzielenia energii, można opisać za pomocą równań mechaniki ośrodków ciągłych, wyrażających prawa zachowania masy, pędu i energii w ujęciu Eulera. Układ równań opisujący prawa zachowania należy uzupełnić związkami konstytutywnymi opisującymi poszczególne materiały.

Do rozwiązania tego zagadnienia wykorzystano jawną implementację metody elementów skończonych zawartą w oprogramowaniu LS-Dyna [3].

2. Model matematyczno-fizyczny

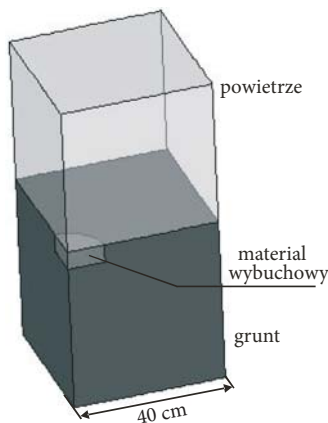
Rozpatrywany model został przedstawiony na rysunku 1. W jego skład wchodzi:

- grunt;
- powietrze;
- materiał wybuchowy (trotyl).

Własności powietrza opisano za pomocą równania Mie-Gruneisena [4]:

$$p = p_0 + \gamma\rho E, \quad (1)$$

gdzie: p — ciśnienie, p_0 — ciśnienie początkowe, γ — współczynnik Gruneisena, E — energia wewnętrzna właściwa, ρ — gęstość.



Rys. 1. Ćwiartka rozpatrywanego układu fizycznego

W prowadzonych pracach dla obszaru powietrza przyjęto następujące parametry ośrodka Eulera: $\gamma = 1,4$; $\rho = 1,185 \text{ kg/m}^3$; $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ [4, 5].

W przypadku pominięcia zjawisk zachodzących podczas reakcji materiału wybuchowego oraz procesów zachodzących na froncie fali uderzeniowej do opisu procesu detonacji można wykorzystać przybliżenie optyki detonacyjnej [6]. Metoda ta polega na określeniu początkowych wartości opisujących wybuch, takich jak: prędkość detonacji materiału wybuchowego, miejsce inicjacji wybuchu, parametry na froncie fali detonacyjnej (w postaci parametrów w punkcie Chapmana-Jougueta) oraz równanie opisujące zachowanie się produktów detonacji. W podejściu tym front fali detonacyjnej porusza się z zadaną, stałą prędkością i tworzy powierzchnię silnej nieciągłości. Z tego względu, podczas obliczeń można rozpatrywać tylko komórki z przereagowanym materiałem wybuchowym, przez które przeszedł już front. W komórkach znajdujących się na froncie fali detonacyjnej przyjmowane są wartości ciśnienia, gęstości i energii (temperatury) odpowiadające wartościom w punkcie Chapmana-Jougueta. Metoda ta pozwala na stosowanie dużych podziałów dyskretyzacji, pozwalających na wydłużenie kroku czasowego (bez wpływu na dokładność otrzymanych wyników).

Do wyznaczenia ciśnienia produktów detonacji wykorzystano równanie JWL (Jones, Wilkins, Lee) [4, 6]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right)^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right)^{-R_2 V} + \omega \rho E, \quad (2)$$

gdzie: $V = \rho_0 / \rho$, ρ_0 — gęstość początkowa;
 ρ — gęstość produktów detonacji;
 A, B, R_1, R_2, ω — stałe.

Podstawowe stałe równania JWL (dla trotylu) przedstawiono w tabeli 1 [4].

Stale równania JWL dla trotylu [4]

TABELA 1

A	B	R_1	R_2	ω
[GPa]	[GPa]	[-]	[-]	[-]
373,8	3,747	4,15	0,9	0,35

Pozostałe parametry (D — prędkość detonacji, p_{CJ} — ciśnienie w punkcie Chapmana-Jougueta, ρ_{CJ} — gęstość w tym punkcie) potrzebne do obliczeń detonacji materiału wybuchowego w przybliżeniu optyki detonacyjnej zawarto w tabeli 2.

TABELA 2

Parametry charakteryzujące trotyl wykorzystane w obliczeniach [4]

ρ_0	D	P_{CJ}	P_{CJ}
[kg/m ³]	[m/s]	[GPa]	[kg/m ³]
1630	6930	21	2230

Największym problemem podczas przygotowań do analizy numerycznej było odpowiednie dobranie modelu gruntu [9] mieszaniny materiałów o różnorodnych właściwościach fizyczno-chemicznych (różnorakiej wilgotności i gęstości zależnej od warunków pogodowych) trudnych do opisu i doboru modelu konstytutywnego.

Jednym z najprostszych modeli, który można wykorzystać do tego celu, jest równanie Mie-Gruneisena (1) z $\gamma \approx 2$ i gęstością odpowiadającą gęstości Ziemi ($\rho = 2,35 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$).

Innym prostym modelem charakteryzującym właściwości gruntu jest model *Mat_Soil_and_Foam_Failure* [3] bazujący na opisie zachowania się ośrodka podobnie do zachowania się ciała sprężysto-plastycznego z nieliniowym umocnieniem rosnącym z odkształceniem. Taki typ umocnienia charakterystyczny jest dla ciał, w których występują pustki (np. pianki) i ma znaczenie, gdy prawie wszystkie pustki ulegają zamknięciu. Model ten został opracowany w 1972 roku przez Kruga. Dane do tego modelu zaczerpnięto z pracy [7].

Jednym z nowszych modeli opisujących zachowanie się gruntu jest model opracowany przez Reida i innych na uniwersytecie Nebraska [8]. Jest on modyfikacją modelu Druckera-Pragra. Uwzględnia on: umocnienie materiału podczas obciążania, umocnienie materiału związane z prędkością odkształcenia oraz osłabienie zachodzące podczas pojawiania się w nim pęknięć włącznie ze zniszczeniem. Zawiera zależności opisujące wpływ pustek oraz wilgotności ziemi na właściwości wytrzymałościowe materiału. Granica plastycznego płynięcia opisana jest za pomocą zmodyfikowanej zależności Mohra-Coulomba. Szczegółowy opis tego modelu zawarty jest w [8].

Jednym z upraszczających założeń do analizy numerycznej była symetria układu (rys. 1) pozwalająca prowadzić obliczenia tylko dla jednej ćwiartki.

Dodatkowo założono, że w chwili początkowej w układzie panuje ciśnienie atmosferyczne. W celu deklaracji wpływów numerycznych z obszaru Eulera na granicach układu przyjęto warunek stałego ciśnienia $p_{brzeg} = \text{const} = 1013 \text{ hPa}$.

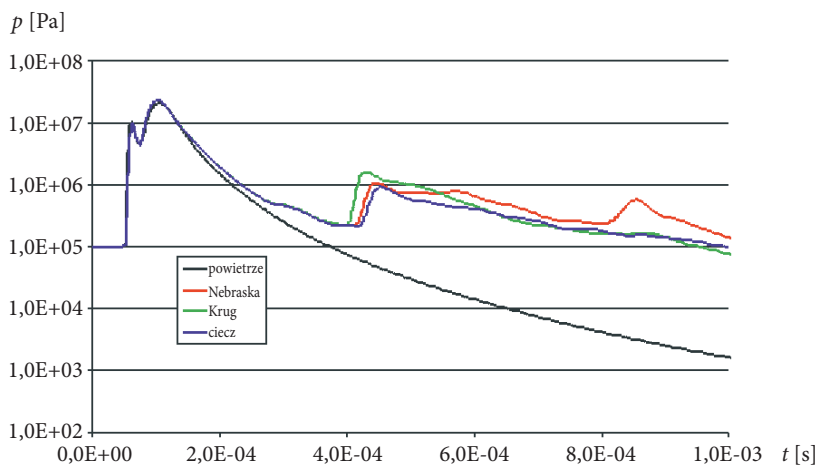
Do analiz przyjęto cylindryczny ładunek wybuchowy o wysokości 0,05 m, promieniu 0,098 m i masie 2,5 kg umieszczony w czterech (najczęściej spotykanych) lokalizacjach:

- na powierzchni gruntu;
- na granicy ośrodków opisujących grunt i powietrze;
- 5 cm pod powierzchnią gruntu;
- 10 cm pod powierzchnią gruntu.

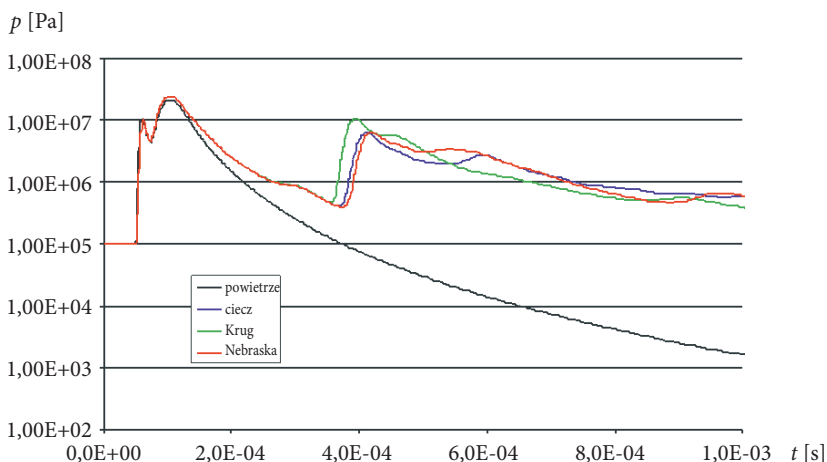
Umieszczenie materiału wybuchowego 10 cm pod powierzchnią gruntu odpowiada wymogom zawartym w STANAG 4569.

3. Wyniki obliczeń

Na rysunku 2 i 3 przedstawiono rozkłady ciśnienia w powietrzu, w odległości 20 cm od górnej powierzchni detonującego materiału wybuchowego o masie 2,5 kg. Poszczególne krzywe odpowiadają przyjętym do obliczeń modelom gruntu. Dla



Rys. 2. Rozkłady ciśnienia w powietrzu po wybuchu ładunku umieszczonego na powierzchni w odległości 20 cm od ładunku dla różnych modeli gruntu

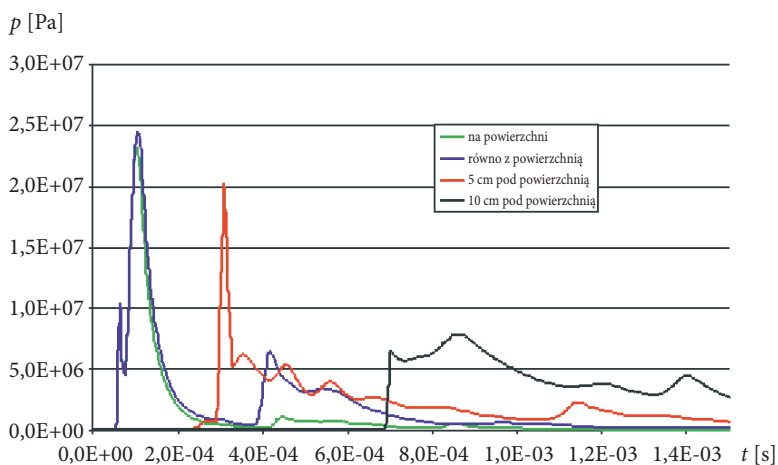


Rys. 3. Rozkłady ciśnienia w powietrzu po wybuchu ładunku umieszczonego równo z powierzchnią w odległości 20 cm od ładunku dla różnych modeli gruntu

porównania przedstawiono wykres ciśnienia w przypadku wybuchu takiego samego ładunku w powietrzu. Krzywe z rysunku 2 odnoszą się do przypadku, w którym ładunek umieszczony jest na powierzchni gruntu, a rysunku 3 — równo z powierzchnią. Nie ma znacznych różnic w wartościach ciśnienia pomiędzy poszczególnymi krzywymi, z wyjątkiem przypadku, gdzie wybuch następuje w powietrzu.

Wybór modelu konstytutywnego do opisu zachowania się gruntu nie wpływa znacząco na wartość ciśnienia generowanego w powietrzu. Ma on natomiast wpływ na kształt i wielkość tworzonego krateru.

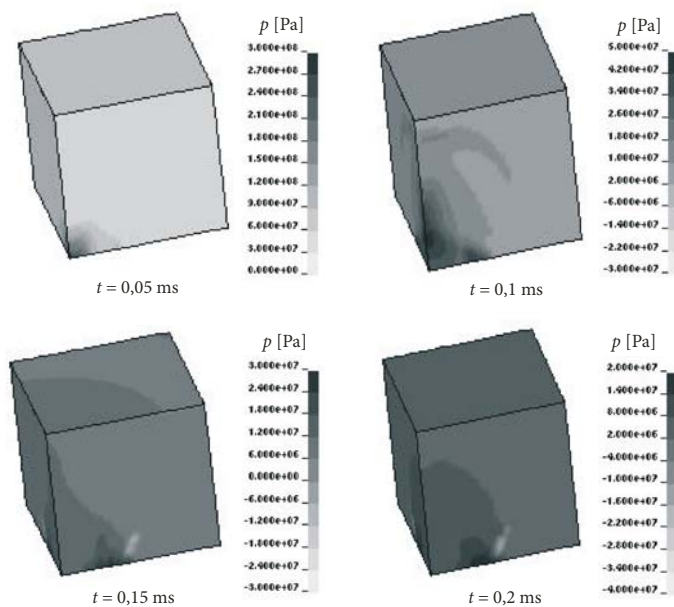
Umieszczenie ładunku wybuchowego ma wpływ nie tylko na intensywność propagującej się fali podmuchowej (rys. 4), ale także na jej kształt (rys. 5 i 6).



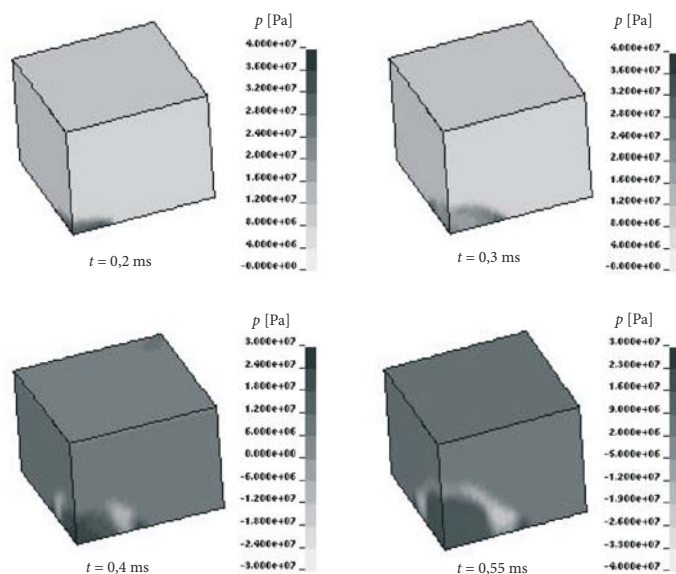
Rys. 4. Rozkłady ciśnienia w powietrzu, w odległości 20 cm od gruntu lub ładunku wybuchowego otrzymane z użyciem modelu Nebraska w zależności od położenia ładunku

W przypadku detonacji materiału wybuchowego, którego przynajmniej jedna powierzchnia ma kontakt z powietrzem, pojawia się duży, początkowy pik ciśnienia, a następnie intensywność fali gwałtownie spada. Gdy ładunek znajduje się pod powierzchnią gruntu, wtedy początkowy impuls ciśnienia ma mniejszą wartość (5 cm pod powierzchnią gruntu) lub zanika (10 cm pod powierzchnią gruntu). Wykres ciśnienia ma w tym wypadku bardziej wolnozmienny charakter. Czas jego trwania znacznie się wydłuża. Niesie on ze sobą znacznie większą ilość energii, a zatem i potencjalnych możliwości niszczących. W związku z powyższymi czynnikami ładunki umiejscowione pod powierzchnią są znacznie groźniejsze, gdy dojdzie do ich wybuchu w przypadku znajdowania się nad nimi pojazdu, a mają o wiele mniejsze możliwości niszczące w innych przypadkach.

Natomiast umiejscowienie ładunku wybuchowego w pobliżu powierzchni powoduje podczas jego detonacji powstanie w powietrzu fali ciśnienia w kształcie



Rys. 5. Rozkłady ciśnienia w powietrzu w wybranych momentach czasu, grunt opisany modelem Nebraska, a górna powierzchnia ładunku wybuchowego pokrywa się z powierzchnią gruntu

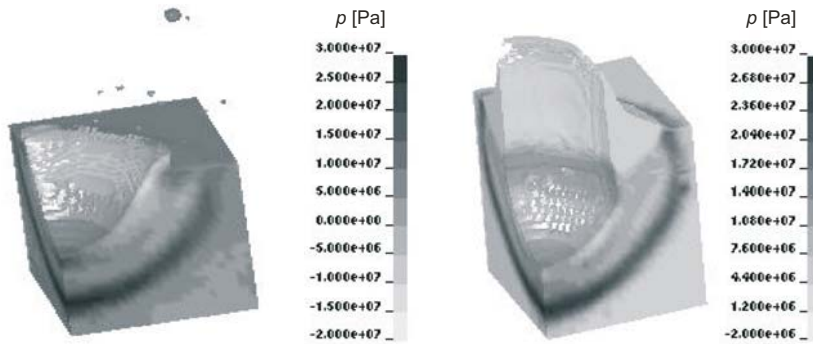


Rys. 6. Rozkłady ciśnienia w powietrzu w wybranych momentach czasu. Grunt opisany modelem Nebraska, a górna powierzchnia ładunku wybuchowego znajduje się 10 cm pod powierzchnią gruntu

zblizonym do pólsfery. Jej intensywność nie jest tak duża (energia wybuchu rozłożona na większą powierzchnię), jednak oddziałując na boczne powierzchnie pojazdu (słabiej chronione) może powodować znaczne szkody.

Ciśnienie w rozrywanym i napędzanym gruncie ma wartość ujemną, co jest widoczne na rysunkach 5 i 6.

Dodatkowo na rysunku 7 przedstawiono rozkłady ciśnienia w gruncie i kształt krateru po czasie 1 ms od momentu detonacji materiału wybuchowego w przypadku umieszczenia ładunku wybuchowego równo z powierzchnią (lewy rysunek) i 10 cm pod nią (prawy rysunek). Procesowi wybuchowego tworzenia krateru towarzyszy napędzanie i wyrzucanie z niego materiału-gruntu. W przypadku umieszczenia ładunku 10 cm pod powierzchnią ziemi ilość wyrzucanego materiału jest znaczna, co stanowi dodatkowy czynnik rażący.



Rys. 7. Rozkład ciśnienia w gruncie — model Nebraska, w chwili $t = 1$ ms; lewy rysunek — ładunek umieszczony równo z powierzchnią gruntu, prawy — 10 cm pod nią

4. Wnioski

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań nad wpływem umieszczenia ładunku na impuls ciśnienia pochodzącego od miny przeciwpancernej.

W wyniku obliczeń stwierdzono, że zależności opisujące zachowanie się gruntu nie mają większego wpływu na intensywność wyznaczonego w powietrzu ciśnienia.

Położenie ładunku, w stosunku do powierzchni gruntu, ma istotny wpływ na kształt propagującej się fali ciśnienia, a także na jej wartość w rozpatrywanym przypadku.

Ze względu na kształt impulsu, jego czas trwania, a zatem i na niesioną przez niego energię najbardziej niebezpieczny jest ładunek umieszczony 10 cm pod powierzchnią ziemi z uwagi na dodatkowy czynnik rażący w postaci napędzanych wybuchem elementów gruntu. Dla gruntów piaszczystych występujących na obsza-

rze Iraku czynnik ten ma o wiele mniejsze znaczenie niż dla afgańskich gruntów kamienistych.

W dalszych pracach planuje się połączyć obszar Eulera opisującego grunt z powietrzem i pojazdem. Przedstawione wyniki mają duże znaczenie w aspekcie bezpieczeństwa żołnierzy biorących udział w misjach pokojowych.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w listopadzie 2009 r.

LITERATURA

- [1] M. IVINGS, *Explosion Hazard Assessment, A Study of the Feasibility and Benefits of Extending Current HSE Methodology to take Account of Blast Sheltering HSL/2001/04 Crown copyright*, 2001.
- [2] D. FIŠEROVÁ, *Numerical Analyses of Buried Mine Explosions with Emphasis on Effect of Soil Properties on Loading*, Cranfield University, 2006.
- [3] J. O. HALLQUIST, *LS-Dyna Theory Manual*, Livermore Software Technology Corporation, Livermore, CA, 2005.
- [4] E. WŁODARCZYK, *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa, 1994.
- [5] W. MIZERSKI, W. NOWACZEK, *Tablice fizyczno-astronomiczne*, Adamatan, 1995.
- [6] K. JACH i in., *Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań metodą punktów swobodnych*, PWN, Warszawa, 2001.
- [7] R. HAYWARD, *Impact modelling of a micro-penetrator dart for martian soil samoling*, praca magisterska, Cranfield University, 2007.
- [8] J. D. REID i in., *Evaluation of LS-Dyna Soil Material Model 147*, raport nr FHWA-HRT-04-094, Federal Highway Administration, 2005.
- [9] R. MARCINKOWSKI i in., *Ośłona techniczna infrastruktury drogowej*, Wydawnictwo WAT, 2006.

R. PANOWICZ, W. BARNAT

Numerical simulation of blast wave

Abstract. The numerical simulations' results of the detonation of improvised explosive device which was laid on the soil or was buried, and blast wave propagation in the air, are considered. Different constitutive models of soil are taken under attention. They have not great influence on pressure wave in the air, but they have great significance on crater size and shape. The simulations show that the maximum pressure, duration of the pressure impulse and its shape varies with depth of burial. The Euler finite element method (LS-Dyna) was used to solve the problem.

Keywords: Finite Element Method, soil constitutive relation, blast wave

Universal Decimal Classification: 534.222.2

