

WPLYW PŁASKIEGO DNA POJAZDU WOJSKOWEGO NA ZAŁOGĘ Z UWZGLĘDNIENIEM MODELU GRUNTU OPISANEGO MODELEM MATERIAŁOWYM MIE-GRUNEISENA

WIESŁAW BARNAT, ROBERT PANOWICZ, TADEUSZ NIEZGODA

*Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wojskowa Akademia Techniczna (WAT)
e-mail: wbnarnat@wat.edu.pl, rpanowicz@wat.edu.pl, tniezgoda@wat.edu.pl,*

Streszczenie. Problematyka odporności udarowej pojazdów jest opisywana w wielu artykułach i dokumentach standaryzacyjnych traktujących o obiektach specjalnych. W pracy przedstawiono wyniki analizy numerycznej układu mechanicznego pojazd-wybuch opisanego poprzez obszar Eulera i elementy Lagrange'a. Interakcje pomiędzy pojazdem a ładunkiem uzyskano dzięki sprzężeniu ogólnemu. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dla elementów struktury nośnej wozu bojowego obciążonej udarem wygenerowanym wybuchem dużego ładunku wybuchowego pod dnem pojazdy przy uwzględnieniu fali odbitej od podłoża modelowanego modelem materiałowym Mie-Gruneisena.

W niniejszej pracy wykorzystano sprzężenie pomiędzy ośrodkiem opisywanym za pomocą równań mechaniki ośrodków ciągłych w ujęciu Eulera, a ośrodkiem opisywanym za pomocą równań Lagrange'a do opisu oddziaływania pomiędzy konstrukcją a obciążającą ją falą ciśnienia pochodzącą od wybuchu. Równaniami w ujęciu Eulera opisuje się zwykle ciecz - w tym wypadku jest to powietrze, w którym dochodzi do detonacji materiału wybuchowego i propagacji fali uderzeniowej. Natomiast równaniami wyrażającymi prawa zachowania masy, pędu i energii w ujęciu Lagrange'a opisuje się zachowanie struktury (konstrukcji). Do sprzężenia oddziaływań płynu i struktury wybrano sprzężenie ogólne, które jest zawarte w standardowej implementacji oprogramowania MSC Dytran.

Celem badań numerycznych przedstawionych w niniejszym artykule było zbadanie wpływu gruntu na wyniki analizy numerycznej, którą przeprowadzono dla przykładowego modelu numerycznego skorupy pojazdu obciążonego oddziaływaniem fali ciśnienia pochodzącej od detonacji dużego ładunku materiału wybuchowego.

Fala ciśnienia wywołana detonacją (zasymulowana w przybliżeniu detonacją punktową) rozchodziła się w obszarze o kształcie sześcianu z nadanymi odpowiednimi warunkami brzegowymi. Rozwiązanie teoretyczne propagacji silnej nieciągłości o kształcie sferycznym zapoczątkowane ze źródła punktowego istnieje w formie analitycznych równań podobieństwa Taylora. Opracowanie pełnowymiarowego modelu pojazdu specjalnego było poprzedzone dodatkowymi badaniami laboratoryjnymi własności mechanicznych stali pancernej wykorzystywanej do budowy tego typu pojazdów. Badania te przeprowadzono w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej WAT.

1. WSTĘP

Wysoka mobilność w dowolnych warunkach klimatycznych i terenie lekkich pojazdów opancerzonych oraz stosunkowo małe wymagania logistyczne dające znaczną samodzielność jednostkom operacyjnym wyposażonym w tego typu pojazdy decydują o tym, że są one podstawowym sprzętem wykorzystywanym przez siły stabilizacyjne różnych państw.

Pojazdy tego typu są narażone na działanie większości środków ogniowych, którymi dysponuje nieprzyjaciel, przede wszystkim improwizowanych ładunków wybuchowych (*ang. improvised explosive devices – IED*). W konsekwencji powoduje to, iż współczesne wymagania taktyczno-techniczne wskazują na sposoby kształtowania kadłubów pancernych wozów bojowych pod kątem zapewnienia wysokiej zdolności do przetrwania na polu walki. Działania te związane są między innymi z zapewnieniem odpowiedniej:

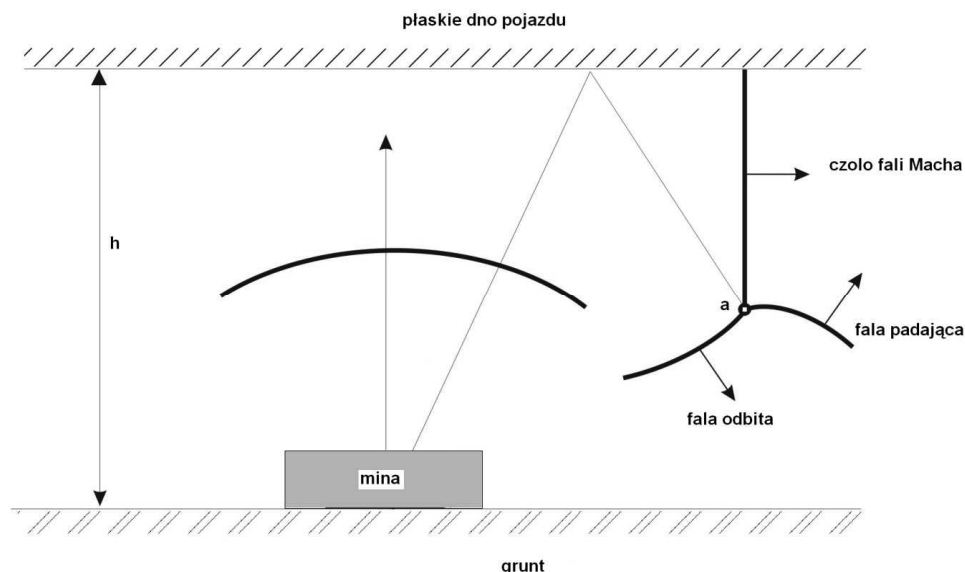
- geometrii pojazdów - odpowiedni poziom ochrony balistycznej,
- ochrony załogi i wyposażenia przed środkami minowymi różnych klas (różnorodne materiały wybuchowe, różne masy, różnorodne umiejscowienie ładunków).

Zasadniczy problem pojawia się przy tworzeniu skutecznej ochrony załogi i wyposażenia zewnętrznego przed środkami minowymi, a w szczególności przed improwizowanymi urządzeniami wybuchowymi.



Rys 1. Krater po wybuchu dużego ładunku tzw. IED (około 500 kg) pod czołgiem [źródło: foto US ARMY]

Ogromny rozwój metod numerycznych oraz wzrost możliwości obliczeniowych współczesnych komputerów pozwala na modelowanie wielu zjawisk fizycznych. Wyżej wspomniany rozwój w powiązaniu z coraz większą dbałością o ochronę bierną powoduje, że poszukuje się coraz to nowszych rozwiązań konstrukcyjnych nie tylko za pomocą klasycznych metod eksperymentalnych, ale także za pomocą eksperymentu komputerowego. Dużą trudnością w opisie zjawisk oddziaływania na dno pojazdu sprawia zjawisko wielokrotnego odbicia pomiędzy płaskim dnem pojazdu a gruntem. Przykład takiego odbicia przedstawia rys 2.

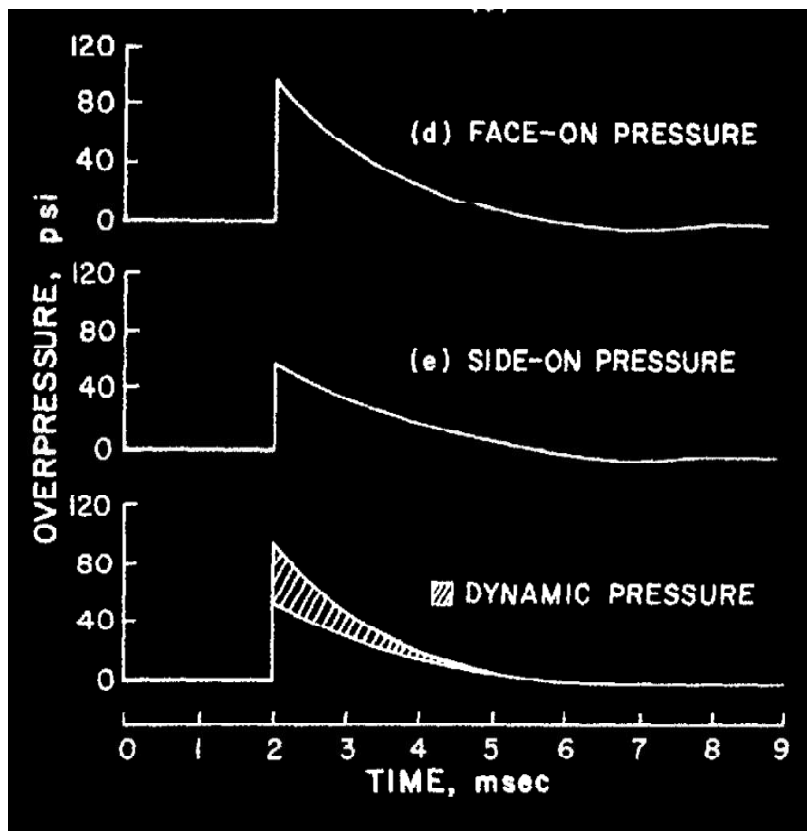


Rys. 2. Przykład odbicia czoła fali od dna pojazdu [źródło: Opracowanie własne]

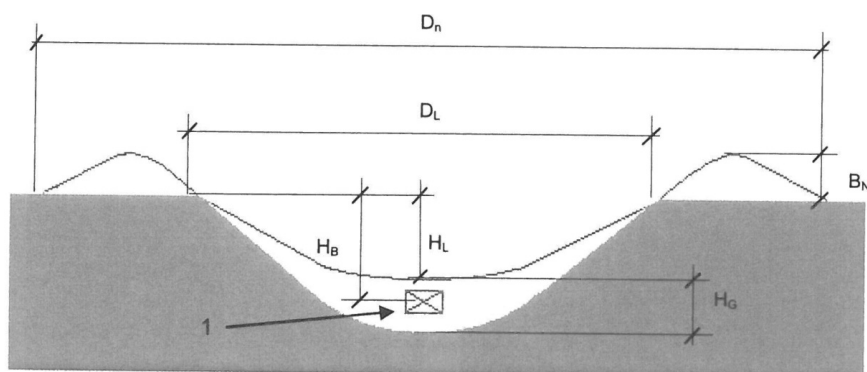
Taki sposób odbicia powoduje między innymi powstawanie fali Macha. Fala ta powstaje w wyniku przecięcia się czoła fali padającej i odbitej od przeszkody (punkt a na rys. 2). Warto zaznaczyć, iż fala ta jest płaska, a jej czoło jest prostopadłe do powierzchni fali odbitej. Zjawisko Macha jest dość rzadkim zjawiskiem i było wykorzystywane podczas silnych wybuchów jądrowych do uzyskiwania zwiększonej siły niszczącej.

Innym zjawiskiem utrudniającym właściwą ocenę oddziaływania ładunków na pojazd jest wzmocnienie impulsu ciśnienia fali padającej (poprzez odbicie). W zależności od sztywności przeszkody [3, 5] wzmocnienie może być nawet dziesięciokrotne. W swoich pracach D. R. Richmond (1970) przedstawił zależność pomiędzy ciśnieniem swobodnym a odbitym od ziemi. Zależność taką przedstawiono na rys. 3.

Kolejnym problemem podczas modelowania oddziaływania wybuchu na dno pojazdu jest opis gruntu, który ma wpływ na wielkość krateru. Problem opisu gruntu był poruszany w wielu pracach. Jedne z nich traktują powstawanie leja powybuchowego jak kolejny czynnik kształtujący impuls, inne, jako sposób wykonywania ukryć. Zarówno jedne jak i drugie przedstawiają najczęściej tabelaryczne zależności wielkości leja od rodzaju gruntu i użytego ładunku [7]. Typowy schemat leja powybuchowego, z wymiarami charakterystycznymi, przedstawiono na rys. 4. Ze względu na zjawiska opisane powyżej, norma NATO STANAG 4569 opisuje model miny przeciwpancernej składającej się między innymi z betonowej podstawy uniemożliwiającej oddziaływanie zmienionej fali ciśnienia pod wpływem odkształcenia gruntu.



Rys. 3. Statyczne i dynamiczne pomiary ciśnienia dla eksplozji następującej blisko ziemi
[źródło: D. R. Richmond 1970]



Rys. 4. Schemat leja powybuchowego [7]: 1 - materiał wybuchowy, H_B – głębokość przenikania bomby lub założenia ładunku (materiału wybuchowego), H_L - -widoczna głębokość leja, H_G – głębokość spulchnionego gruntu w nasypie przyległym, D_n – średnica nasypu, B_N - wielkość nasypu gruntu

W niniejszej pracy wykorzystano sprzężenie ALE do opisu oddziaływania pomiędzy konstrukcją a obciążającą ją falą ciśnienia pochodzącą od wybuchu [8] (pomiędzy ośrodkiem opisywanym za pomocą równań mechaniki ośrodków ciągłych w ujęciu Eulera a ośrodkiem opisywanym za pomocą równań Lagrange'a). Równaniami w ujęciu Eulera opisuje się zwykle ciecz - w tym wypadku jest to powietrze, w którym dochodzi do detonacji materiału wybuchowego i propagacji fali uderzeniowej. Natomiast równaniami wyrażającymi prawa zachowania masy, pędu i energii w ujęciu Lagrange'a opisuje się zachowanie struktury. Złożony charakter procesu detonacji materiału wybuchowego i propagacji fali uderzeniowej powoduje duże problemy obliczeniowe wymuszając opracowanie specjalnych technik obliczeniowych modelowania tego zjawiska. Zjawisku i sposobom jego modelowania poświęcono wiele uwagi w literaturze [1, 2, 3].

Podczas obliczeń użyto jednakowego schematu całkowania równań ruchu w czasie, zarówno dla cieczy jak i konstrukcji. Celem badań numerycznych przedstawionych w niniejszym artykule było wstępne zbadanie wpływu gruntu na wyniki analizy numerycznej.

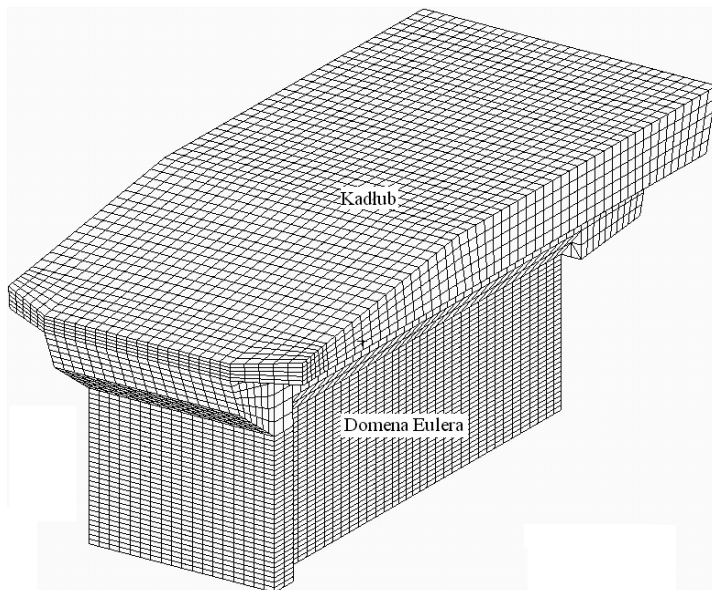
2. OGÓLNY OPIS MODELU NUMERYCZNEGO

Analizę numeryczną przeprowadzono dla modelu numerycznego skorupy pojazdu gąsienicowego (typu lekki czołg) obciążonego oddziaływaniem fali ciśnienia pochodzącej od detonacji dużego ładunku materiału wybuchowego.

Fala ciśnienia wywołana detonacją (zasymulowana w przybliżeniu detonacją punktową) rozchodziła się w obszarze o kształcie sześcienu z nadanymi odpowiednimi warunkami brzegowymi. Pozwala to na komputerową symulację procesu propagacji fali uderzeniowej poprzez nadanie odpowiednich warunków początkowych (gęstość, energia, ciśnienie) pewnym, wybranym elementom z domeny Eulera, a następnie rozwiązanie równań praw zachowania masy, pędu i energii. Typowe wartości dla substancji wybuchowych to: gęstość 1600 kg/m^3 i energia wewnętrzna właściwa - $4,2 \text{ MJ/kg}$.

W obliczeniach uwzględniano zmiany wywołane deformacją kadłuba pojazdu. Warstwa, w której rozprzestrzeniała się fala uderzeniowa, została zamodelowana przy pomocy eulerowskich elementów typu Hex 8 z własnościami gazu idealnego - $\gamma = 1,4$ i gęstości odpowiadającej gęstości powietrza atmosferycznego w warunkach normalnych ($\rho = 1,28 \text{ kg/m}^3$). Grunt opisano modelem materiałowym Mie-Gruneisena [5] o następujących parametrach: $\gamma = 2$ i gęstości odpowiadającej gęstości gruntu ($\rho = 2,35 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$). Założono, że pod gruntem znajduje się skała, którą modelowano jako ciało nieodkształcalne. Elementy Lagrange'a typu Shell Quad 4 wykorzystano do modelowania zachowania się płyt stalowych pojazdu. Elementom tym nadano następujące własności mechaniczne: $E = 2,1 \cdot 10^9 \text{ MPa}$, $\nu = 0,31$. Do opisu zachowania się stali wykorzystano biliniowy model materiału elastoplastycznego DYMAT 24. Za kryterium zniszczenia przyjęto maksymalne odkształcenie [4].

Opracowanie pełnowymiarowego modelu pojazdu specjalnego było poprzedzone dodatkowymi badaniami laboratoryjnymi własności mechanicznych stali pancernej wykorzystywanej do budowy tego typu pojazdów. Badania te przeprowadzono w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej WAT. Ogólny widok modelu numerycznego pojazdu jak i przekrój całego układu został przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Schemat modelu numerycznego pojazdu

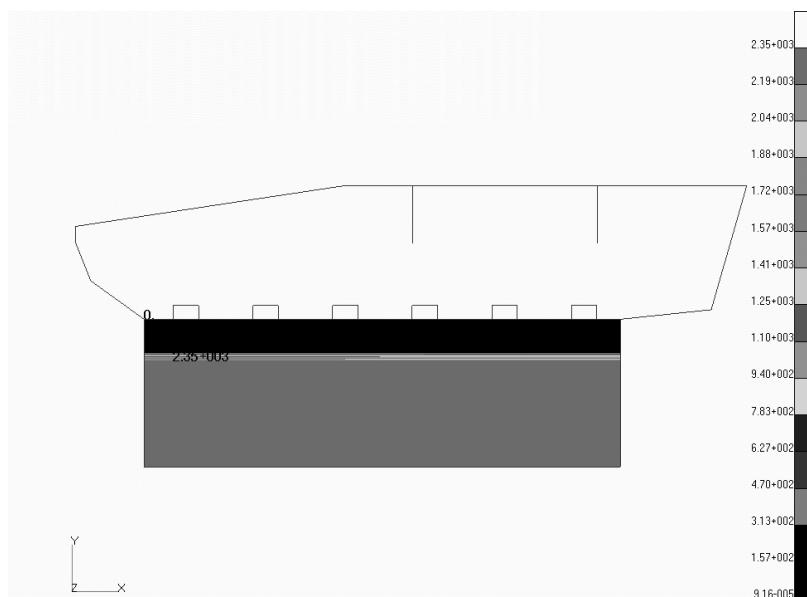
We wszystkich modelach użytych w niniejszej pracy węzły elementów strukturalnych (węzły domeny Lagrange'a) nie miały narzuconych żadnych warunków początkowych. Oznacza to, że wszystkie prędkości i przemieszczenia dla czasu $t = 0$ były wyzerowane.

Wszystkie testy wojskowych pojazdów opancerzonych są przeprowadzane zgodnie z odpowiednią normą, w tym przypadku jest to NATO STANAG 4569. Jednym z możliwych testów odporności przeciwminowej jest badanie skutków detonacji miny przeciwpancernej TM 57 o masie ładunku 6,34 kg TNT. Ze względu na konieczność ochrony przed improwizowanymi ładunkami wybuchowymi, których masa znacznie przekracza masę min przeciwpancernych, przeprowadzono również analizy modeli pojazdów obciążonych ładunkiem IED których masa może znacznie przekraczać masę miny TM 57.

3. WYNIKI ANALIZY NUMERYCZNEJ

W pierwszym etapie analiz numerycznych model obciążono falą ciśnienia pochodzącą z detonacji ładunku materiału wybuchowego o masie większej niż dla miny przeciwpancernej TM 57. Ładunek został umieszczony centralnie pod pojazdem. Podczas dodatkowych badań numerycznych przeanalizowano wpływ położenia ładunku na skutki jego działania. Główne analizy dotyczyły ładunku o masie odpowiadającej wielokrotnej masie materiału wybuchowego zawartego w minie TM57.

W wyniku analizy numerycznej uzyskano m.in. wykresy przemieszczeń, przyspieszeń i prędkości punktów charakterystycznych. Na rys. 6 przedstawiono rozkład gęstości ośrodków (gruntu i powietrza) w chwili początkowej $t = 0$ s.



Rys. 6. Początkowy rozkład gęstości dwóch ośrodków (gruntu i powietrza)

Następny rysunek przedstawia rozkład gęstości dla chwili czasowej $t = 0,00056$ s. Na rysunku widoczny jest krater o gęstości ośrodka zbliżonej do gęstości powietrza. Powiększenie wielkości lejka powybuchowego przedstawiono na rys. 8. Przedstawiono na nim rozkład ciśnienia dla czasu $t = 0,002$ s.

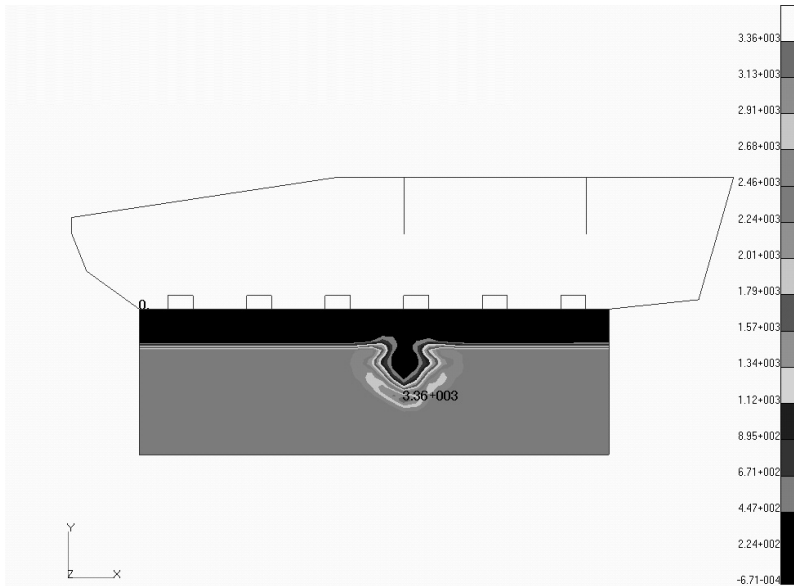
Interesujące jest zwiększenie gęstości ośrodka w obszarze powstawania lejka. Takie zjawisko jest powodowane oddziaływaniem ciśnienia wybuchu na grunt. Widać także różnice w rozchodzeniu się fal dźwiękowych (ze względu na różnice gęstości pomiędzy ośrodkami). Uzyskano obszary nasypu gruntu występujące po wybuchu – rys. 8 (por. z rys. 4).

4. WNIOSKI

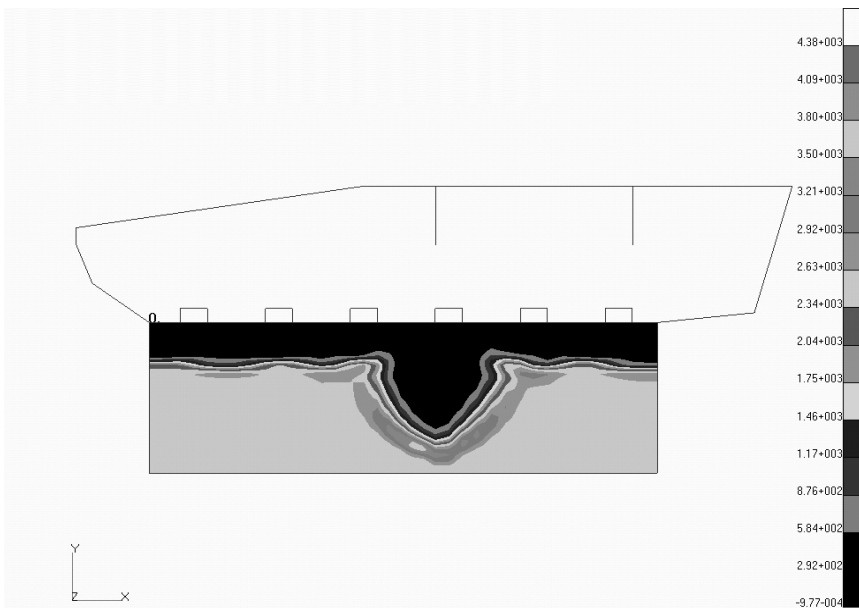
Zastosowanie modelu gruntu spowodowało zwiększenie przeniesienia impulsu ciśnienia na dno pojazdu. Takie opisanie warunków początkowo-brzegowych spowodowało zwiększenie o 40% przemieszczenia węzła znajdującego się na podłodze pojazdu w porównaniu z innymi pracami. Dodatkowo zastosowanie sprzężenia ALE spowodowało, iż całość energii wybuchu została przekazana na badaną konstrukcję [9]. Zastosowanie takiego rodzaju sprzężenia niewątpliwie wpływa na jakość uzyskanych wyników.

Ponieważ wpływ kształtu siatki na wartości ciśnienia na czole fali uderzeniowej jest stosunkowo niewielki, w analizie bazowano na sześcienniej, ale odpowiednio gęstej, siatce elementów Eulera.

W pracy przedstawiono wycinek badań nad badaniem rozchodzenia się fali ciśnienia. W kolejnych pracach planuje się uwzględnić elementy układu przeniesienia mocy i gąsienicowego układu jezdnego.



Rys. 7. Rozkład gęstości dwóch ośrodków (gruntu i powietrza) dla czasu $t = 0,00056$ s



Rys. 8. Sposób rozchodzenia się fali ciśnienia – powiększenie krateru w chwili $t = 0,002$ s

LITERATURA

1. Krzewiński R., Rekrucki R.: Roboty budowlane przy użyciu materiałów wybuchowych. Polcen, 2005.
2. Thornton P. H., Jeryan R. A.: Crash Energy Management in Composite Automotive Structures. "International Journal of Impact Engineering" 1988, Vol. 7, No 2, p. 167-180.
3. Babul W.: Odształcanie metali wybuchem. Warszawa: WNT, 1980.
4. Włodarczyk E.: Wstęp do mechaniki wybuchu. Warszawa: PWN, 1994.
5. Dytran Theory Manual, 2004; LS-DYNA theoretical manual, 1998.
6. Ls_Dyna Theory Manual, Livermore, CA, 2005.
7. Baker, W. E.: Explosions in air. Austin & London: University of Texas Press, 1973.
8. Instrukcja „Prace inżynierskie i niszczenia”. Sztab Generalny WP, Szefostwo Wojsk Inżynieryjnych, Warszawa 1995.
9. Barnat W.: Numeryczno doświadczalna analiza złożonych warstw ochronnych obciążonych falą uderzeniową wybuchu. Warszawa: Bell Studio, 2010.

**THE INFLUENCE OF THE FLAT BOTTOM
OF A MILITARY VEHICLE
ON CREW WITH REGARDS TO THE SOIL DESCRIBED
WITH THE MIE-GRUNEISEN MODEL**

Summary. The problem of vehicle's resistance on loads impact and standardizations issues, concerning special structures, are broadly discussed in many articles. In this paper, the numerical analysis results from an armoured vehicle, loaded with explosives detonation blast wave is presented. Ground proximity effects in the wave reflection process that is also taken into account. The aim of this study is to examine how to include the ground model into the simulation of impact of blast wave, being the result of detonation of large explosives on a structure of an armoured vehicle's hull. Additional material study of an armour steel was conducted in Department Of Mechanics And Applied Computer Science, Military University of Technology, in order to obtain suitable material.

