



Numeryczno-doświadczalne badania wpływu przeszkody na rozkład ciśnienia

WIESŁAW BARNAT, ROMAN GIELETA, TADEUSZ NIEZGODA

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

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań nad modelowaniem układu wybuch-półsfera. Falę uderzeniową badano w sposób numeryczny i analityczny. W celu przeprowadzenia weryfikacji uzyskanych wyników wykonano stanowisko do badań eksperymentalnych.

Słowa kluczowe: wybuch, bezpieczeństwo, półsfera

Symbolne UKD: 536.46

1. Wstęp

Celem niniejszej pracy jest zbadanie możliwości modelowania oddziaływania fali ciśnienia wywołanej wybuchem 100 g ładunku kulistego na półsferyczną przeszkodę nieodkształcalną. Analiz ww. zjawiska dokonano z wykorzystaniem metod numerycznych za pomocą oprogramowania MSC Dytran. Przedstawione badania stanowią jeden z etapów opracowania koncepcji struktur ochronnych obiektów wojskowych i cywilnych. Wyniki doświadczenia posłużą do kalibracji modeli numerycznych struktur obciążonych impulsowo.

W dostępnej literaturze istnieje wiele podejść do symulacji wybuchu. Niektórzy autorzy przedstawiają w swych opracowaniach [1 i 2] zjawisko wybuchu jako odpowiednio dobrany impuls ciśnienia. W innym opracowaniu [3] przedstawiono podejście do modelowania wybuchu poprzez spalanie ładunku wybuchowego. W niniejszym opracowaniu model wybuchu został ograniczony do przedstawienia modelu ośrodka (powietrza), w którym jest on rozprzestrzeniany i opisany

obszarem Eulera. W obszarze tym umieszczono skupioną energię początkową w kształcie walca. Takie rozwiązanie problemu daje dość dobre wyniki [4]. Połączenie pomiędzy elementami Eulera a Lagrange'a uzyskano poprzez zastosowanie sprzężenia generalnego [9].

2. Analityczne podejście do problemu

Opis zagadnienia propagacji fali uderzeniowej, w przypadku gdy jej źródłem jest detonacja materiału wybuchowego w powietrzu, jest bardzo złożony ze względu na konieczność uwzględnienia geometrii ładunku, kinetyki reakcji chemicznych, ściśliwości ośrodka, obecności powierzchni silnych nieciągłości. Czynniki te powodują iż problem ten praktycznie jest nierozwiązywalny metodami analitycznymi. Nawet metody numeryczne muszą być dobierane w szczególny sposób, aby poprawnie opisywały przepływy z obecnością fal uderzeniowych. Niezaprzeczalne zalety rozwiązań analitycznych wymusiły poszukiwania uproszczonego opisu powstawania i transmisji fali uderzeniowej w powietrzu. Jednym z takich uproszczeń jest m.in. teoria wybuchu punktowego.

W podstawowym podejściu do opisu fali uderzeniowej wywołanej wybuchem stosuje się metody numeryczne lub wzory uproszczone. W analizie konstrukcji przyjmuje się [1, 2, 5], iż efekt działania fali uderzeniowej jest zależny od parametru wybuchu Z :

$$Z = \frac{R}{\sqrt[3]{W}}, \quad (1)$$

gdzie: W — masa ładunku;
 R — odległość wybuchu od badanego obiektu.

Przybliżoną wartość maksymalnego ciśnienia na froncie fali uderzeniowej oblicza się jako funkcję parametru Z :

$$p = p\left(\frac{1}{Z}\right) = p\left(\frac{\sqrt[3]{W}}{R}\right). \quad (2)$$

Oznacza to, że tak oszacowane maksymalne ciśnienie p wywołane przez ładunek o masie 100 g w odległości 0,4 m ma tę samą wartość jak ciśnienie wywołane przez ładunek o masie 100 kg w odległości 4 m. Efekt działania fali jest jednak w drugim przypadku znacznie większy, ponieważ czas trwania impulsu jest około 10 razy dłuższy [5].

W obliczeniach stosuje się różne przybliżenia funkcji ciśnienia, jej najprostsze oszacowanie ma postać [5]:

$$p = \frac{1}{2\pi} Q \frac{1}{Z^3} = 0,159Q \frac{1}{Z^3}, \quad (3)$$

gdzie Q — jednostkowa energia wewnętrzna materiału wybuchowego (dla TNT 4,2 MJ/kg).

Dokładniejsze przybliżenie można uzyskać, stosując wzór:

$$p = \frac{a_1}{Z} + \frac{a_2}{Z^2} + \frac{a_3}{Z^3}, \quad (4)$$

gdzie: $a_1 = 82400$, $a_2 = 264870$, $a_3 = 686700$ — wartości parametrów obliczone dla TNT na podstawie [5] przy założeniu, że Z jest wyrażone w $\frac{m}{\sqrt[3]{kg}}$, a wartość ciśnienia w [Pa].

Wzory (3) i (4) otrzymano, wykorzystując hipotezę detonacji natychmiastowej. Przybliżenie (3) to praktycznie trzeci, najbardziej znaczący człon (4). Wartości maksymalnego ciśnienia p uzyskane ze wzoru (4) są około 25% większe niż ze wzoru (3).

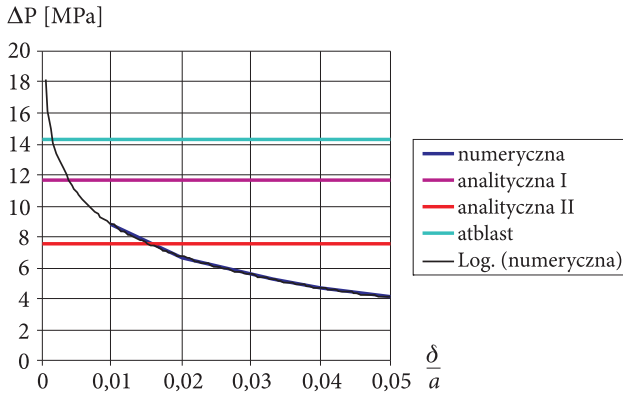
W rzeczywistości postać funkcji (2) jest dużo bardziej złożona niż wzory (3) i (4). Ciśnienie równoważne działaniu fali uderzeniowej wybuchu dla danego parametru Z można określić z większą dokładnością na podstawie tabel opracowanych przez Departament Obrony USA lub stosując zaawansowane metody numeryczne do rozwiązania złożonych modeli wybuchu uwzględniających proces jego inicjacji i propagacji fali uderzeniowej.

Wzory (3, 4) pozwalają na oszacowanie ciśnienia fali rozchodzącej się swobodnie w powietrzu. Ciśnienie fali uderzeniowej odbijającej się od przeszkody jest znacznie wyższe (wzrasta od 2 do 8 razy w stosunku do ciśnienia fali swobodnej) i może być szacowane ze wzoru:

$$p_o = p_c \left(2 + \frac{6p_c}{p_c + 7p_1} \right), \quad (5)$$

gdzie: p_o — ciśnienie fali odbitej;
 p_c — ciśnienie fali swobodnej;
 p_1 — ciśnienie powietrza.

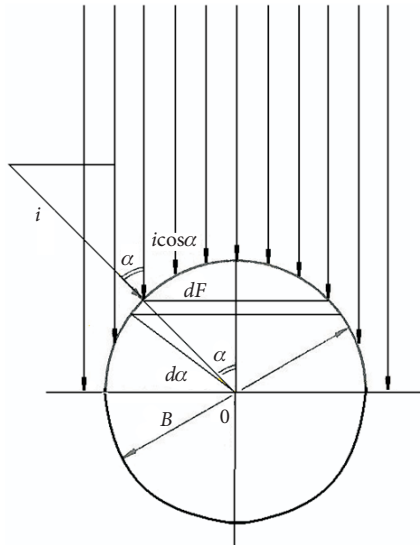
Na rysunku 1 porównano wartości ciśnienia uzyskane numerycznie i analitycznie odpowiednio dla fali swobodnej i odbitej od płaskiej przeszkody. Wartość ciśnienia analityczna I została uzyskana na podstawie wzorów (5), analityczna II — z (4), a atblast — na podstawie tabeli zawartej w dostępnej literaturze [5].



Rys. 1. Analiza wartości ciśnienia ΔP fali odbitej od sztywnej przeszkody

Powyższy opis dotyczy oddziaływania na nieodkształcalną płaską przegrodę. W dostępnej literaturze spotkano opis zjawiska wpływu kształtu przegrody na wielkość przyjmowanego obciążenia [8].

W opracowaniu tym autor rozważał przegrody o różnych kształtach: kuli, walca, belki o przekroju kwadratowym. W założonym przypadku na nieodkształcalną przegrodę skierowany jest strumień gazów, powstały w wyniku wybuchu płaskiego ładunku wybuchowego, o równoległych torach cząsteczek i stałej intensywności. Schemat obliczeniowy dla kuli przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat obliczeniowy działania produktów wybuchu na kulę

Na podstawie przytoczonej literatury [8] stwierdzono, iż impuls jednostkowy generowany wybuchem ładunku płaskiego działający w dowolnym punkcie kuli wynosi:

$$i = 2\Pi A_o C_p \cos^2 \alpha \quad (6)$$

lub

$$i = i_o \cos^2 \alpha, \quad (7)$$

$$i_o = 2\Pi A_o C_p, \quad (8)$$

gdzie: A_o — stała charakteryzująca własności materiału wybuchowego (dla trotylu wynosi 387÷410 m/s);
 C_p — początkowa masa ładunku.

Na okręgu o promieniu $\frac{b}{2} \sin \alpha$ wartości impulsu jednostkowego są jednakowe, dlatego elementarną powierzchnię stanowi pierścień o promieniu wewnętrznym $\frac{b}{2} \sin \alpha$ i szerokości $\frac{b}{2} d\alpha$, dla którego:

$$dF = 2 * \Pi * \frac{b}{2} * \sin \alpha \frac{b}{2} d\alpha = * \frac{\Pi b^2}{2} \sin \alpha d\alpha. \quad (9)$$

Podstawiając dF do związku:

$$J = \int_F idF \quad (10)$$

z uwagi na działanie na kierunku propagacji gazów tylko jednostkowej składowej $i \cos \alpha$, otrzymamy

$$J = \frac{\Pi b^2}{2} * i_o * \frac{1}{2}. \quad (11)$$

Łatwo zauważyć, że impuls działający na kulę jest równy iloczynowi powierzchni maksymalnego przekroju kuli, normalnego do kierunku działania strumienia $\frac{\Pi b^2}{4}$, maksymalnej wartości jednostkowego impulsu płaskiego strumienia i_o oraz współczynnika kształtu:

$$k_f = \frac{1}{2}.$$

Dla walca współczynnik ten będzie wynosił:

$$k_f = \frac{2}{3}.$$

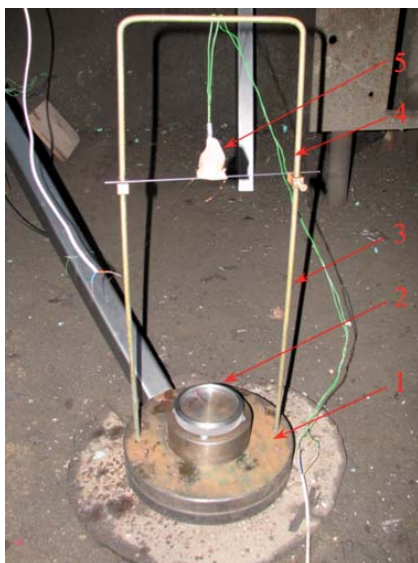
Na podstawie badań literaturowych stwierdzono, że półsfera jest najbardziej optymalną konstrukcją ze względu na opływy. Z tego względu postanowiono przebadać numerycznie (z weryfikacją eksperymentalną) półsferę.

3. Wyniki badań eksperymentalnych

Na podstawie analizy literatury zaprojektowano i wykonano autorskie stanowisko, które umożliwiło przeprowadzenie badań eksperymentalnych (pomiaru ciśnienia padającego na półsferę w przeliczeniu na siłę nacisku u podstawy stanowiska).

Do badań energochłonności próbek struktur przestrzennych wykorzystano laboratorium do obciążania falą uderzeniową wybuchu znajdujące się w Zakładzie Materiałów Wybuchowych Wydziału Inżynierii Chemii i Fizyki Technicznej WAT oraz układ pomiaru siły (przedstawiony na rysunku 3) oddziałującej na badany obiekt zaprojektowany i wykonany w Katedrze Mechaniki i Informatyki Stosowanej. Sygnały z przetwornika siły wzmacniano za pomocą stałoprądowego wzmacniacza tensometrycznego MS 1001 firmy INFEL ze Świdnika.

Rejestrację przebiegów przeprowadzano z wykorzystaniem karty pomiarowej firmy National Instruments model NI-USB 6251 z szybkim przetwornikiem analogowo-cyfrowym (próbkowanie 1,25 MHz na jednym kanale), przenośnego



Rys. 3. Układ pomiaru siły używany w badaniach: 1 — podstawa; 2 — układ mocowania próbki z tensometrycznym przetwornikiem siły (tzw. stolik pomiarowy); 3 — ramka mocowania materiału wybuchowego; 4 — ogranicznik wysokości, 5 — materiał wybuchowy

komputera TOSHIBA Satellite oraz autorskiego programu do obsługi karty pomiarowej wykonanego we własnym zakresie. Mierzone przebiegi były równocześnie rejestrowane za pomocą cyfrowego oscyloskopu firmy AGILENT model 54600. Taki sposób rejestracji miał za zadanie zminimalizować możliwość utraty cennych danych oraz bieżącą kontrolę pracy układu pomiaru siły. Aparaturę wykorzystywaną w badaniach przedstawiono na rysunku 4.



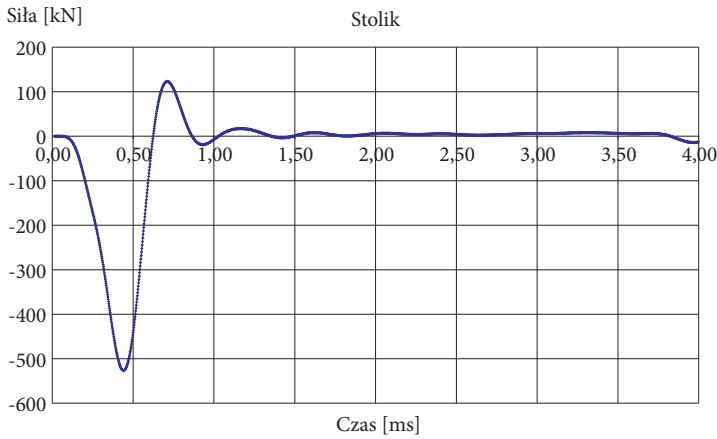
Rys. 4. Aparatura użyta do rejestracji danych

Źródłem fali uderzeniowej był ładunek 100 g TNT umieszczony w odległości 0,4 m od podstawy badanego obiektu. Materiał wybuchowy umieszczono swobodnie nad próbką zgodnie z rysunkiem 3. Wywołane wybuchem obciążenie impulsowe charakteryzuje się krótkim czasem trwania i dużą amplitudą. Czas trwania takiego impulsu ciśnienia jest o rząd, a nawet dwa rzędy krótszy od czasu uderzenia i wynosi kilka dziesiątych milisekundy. Podczas wykonywania eksperymentu dokonano pomiarów ciśnienia (siły) działającej na półsferę oraz na swobodny stolik pomiarowy przedstawiony na rysunku 3.

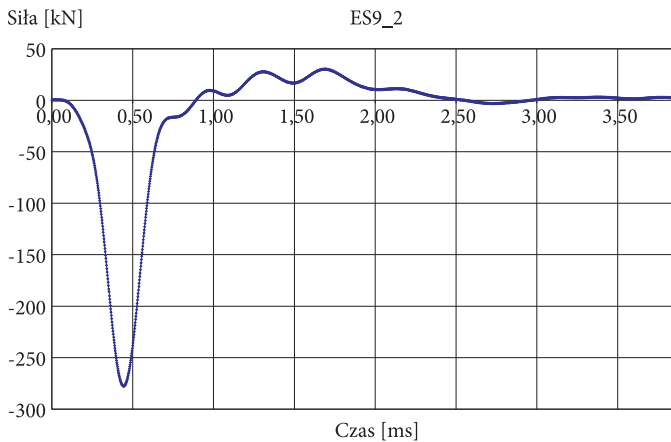
W badaniach doświadczalnych obiektem badań była półsfera o promieniu zewnętrznym 50 mm, wykonana z kompozytu szklanego metodą formowania ręcznego z użyciem żywicy epoksydowej 53 z utwardzaczem Z1.

Pomiar siły zrealizowano przy pomocy tensometrów zamocowanych do układu mocowania próbki. W celu wyeliminowania przypadkowych błędów pomiaru badania eksperymentalne powtórzono kilkakrotnie. Uzyskane eksperymentalnie przebiegi zmiany siły pochodzącej od fali uderzeniowej przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

W przypadku badań ze stanowiskiem pomiarowym (bez elementów energochłonnych) w początkowym okresie dla czasu od 0 do 0,45 ms nastąpił wzrost siły reakcji stolika (spowodowany dotarciem czoła fali uderzeniowej do elementu pomiarowego). Maksymalna wartość siły wyniosła 530 kN i wraz z upływem czasu (na skutek zaprzestania oddziaływania impulsu ciśnienia) spadała do 0 N.



Rys. 5. Przebieg zmian obciążenia na stolik pomiarowy (bez struktury ochronnej)



Rys. 6. Przebieg zmian obciążenia stolika pomiarowego z półsferą wykonaną z kompozytu szklanego

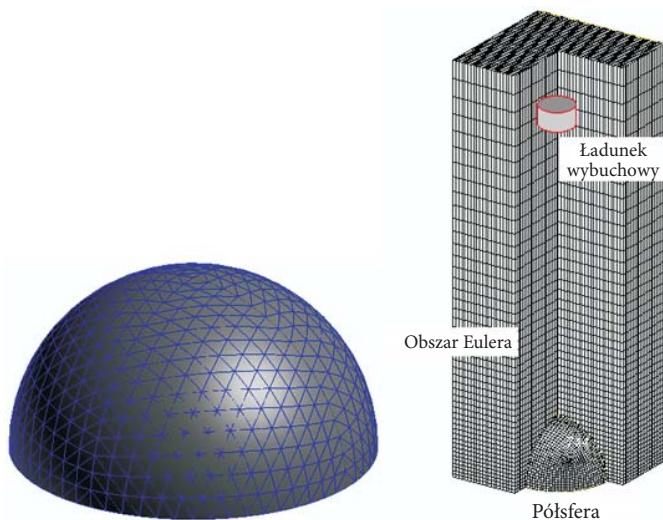
Podczas badań układu z półsferą (podobnie jak dla samego stolika) w początkowym okresie od 0 do 0,45 ms nastąpił wzrost siły działającej na półsferę (spowodowany dotarciem czoła fali ciśnienia). Maksymalna wartość siły wyniosła 277 kN. Wykres zmiany obciążenia stolika pomiarowego z półsferą wykonaną z kompozytu przedstawia rysunek 6. Wraz z upływem czasu (podobnie jak w poprzednim przypadku) siła spadła do zera. Porównując wyniki badań dla układu ze stolikiem pomiarowym i półsferą stwierdzono, że zastosowanie półsfery zredukowało wartość siły działającej na stolik o 47%.

4. Wyniki badań numerycznych

Do numerycznych badań symulacyjnych przyjęto półsferę o promieniu $r = 50$ mm i grubości $g = 6$ mm. Podobnie do badań doświadczalnych w badaniach numerycznych sfera została utwierdzona na obwodzie. Ocenę porównawczą pomiędzy badaniami doświadczalnymi a analizą MES oparto o porównanie sumy reakcji w podporach półsfery z siłą normalną, uzyskaną w sposób eksperymentalny, występującą u podstawy stolika (na którym zamontowano półsferę). Grubość sfery została tak dostosowana do wielkości ładunku, by nie spowodować zniszczenia sfery. W celu związania elementów Lagrange'a z elementami Eulera zastosowano sprzężenie generalne. Symulacje uderzenia impulsem ciśnienia wykonano za pomocą systemu MSC Dytran z zastosowanymi powłokowymi elementami skończonymi typu QUAD4 [9].

Ze względu na dobre wyniki uzyskane dla półsfer skupiono się nad tym rozwiązaniem. Badany element energochłonny został zamodelowany jako element cienkościenny wykonany z kompozytu o następujących właściwościach materiałowych [7]: $E = 6,8$ GPa, $\nu = 0,27$, $R_m = 83,5$ MPa, $\rho = 1618$ kg/m³, gdzie E , ν — stałe sprężystości, R_m — granica wytrzymałości, ρ — gęstość. W obliczeniach numerycznych przyjęto model zniszczenia maksymalnych naprężeń 170 MPa.

Do analizy numerycznej przyjęto następujące założenia odnośnie źródła fali uderzeniowej (zbliżone do badań eksperymentalnych): ładunek TNT w kształcie walca o masie 100 g, umieszczony w odległości 0,4 m od badanego obiektu. Ogólny widok badanego układu przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Ogólny widok badanego układu, obszar Euler a i półsfera

Do modelowania przestrzeni Eulera sprzężonej ze strukturą Lagrange'a zastosowano elementy sześciennie. Taki wybór kształtu elementów wynika z konieczności dopasowania elementów siatki Eulera do siatki elementów skończonych definiujących badany obiekt. Kulista fala uderzeniowa rozchodząca się w siatce elementów sześciennych ulega niewielkiemu zniekształceniu [10].

Przy dużych zmianach (gradientach) ciśnienia wielkość siatki elementów ma duży wpływ na obliczane wartości ciśnienia. Dlatego elementy Eulera są bardzo wrażliwe na zmiany parametrów siatki. Z drugiej strony zagęszczanie siatki elementów wymaga (na etapie obliczeń) coraz większej pamięci zewnętrznej i operacyjnej. Wielkość elementów siatki ustala się na podstawie porównania wartości ciśnień uzyskanych numerycznie i oszacowanych analitycznie lub eksperymentalnie [10]. Z porównania wyników numerycznych i analitycznych, stwierdzono, że parametry siatki należy dostosować do każdej zmiany wielkości ładunku. Na podstawie wielu eksperymentów dobrano wielkość siatki elementów Eulera.

Ponieważ wpływ kształtu siatki na wartości ciśnienia na czole fali uderzeniowej jest stosunkowo niewielki, w dalszej analizie bazowano na sześciennych, ale odpowiednio gęstszej siatce elementów Eulera w obszarze sprzężenia generalnego.

Na rysunku 8 przedstawiono kolejne fazy rozchodzenia się ciśnienia w porównaniu z wektorem prędkości gazu dla 100 g ładunku TNT (dla wybranych chwil czasowych).

Dla czasu $3,78 \text{ E-5 s}$ (rys. 8a) następuje dojście frontu fali o prędkości 2980 m/s i ciśnieniu na froncie fali 1,2 MPa.

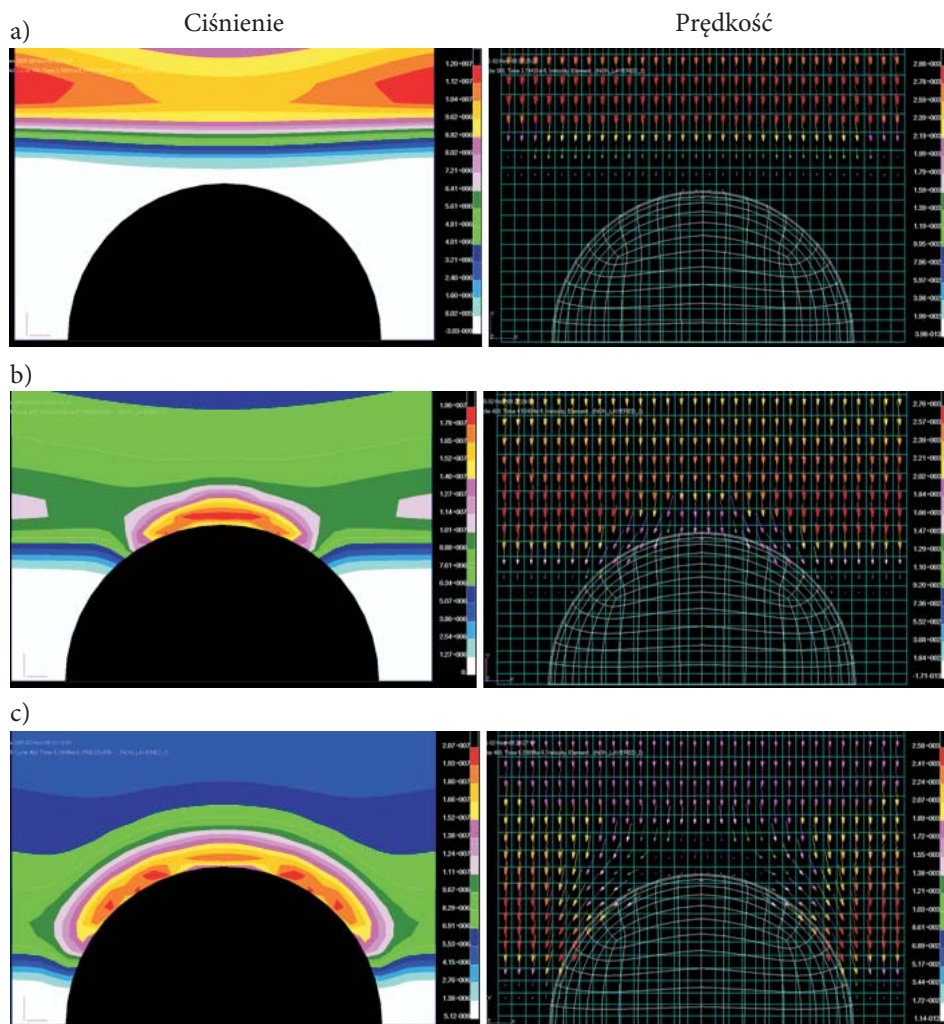
W wyniku odbicia (dla czasu $4,53 \text{ E-5 s}$) od półsfery nastąpiło punktowe wzmocnienie impulsu ciśnienia do wartości do 15 MPa, przedstawione na rysunku 8b. Z powodu natrafienia na przeszkodę w postaci półsfery nastąpiła zmiana kierunku wektora prędkości gazu.

W najbardziej niekorzystnym przypadku istnieje możliwość zniszczenia górnej części sfery.

W kolejnych krokach obliczeń, przykładowo dla czasu $5,29 \text{ E-5 s}$, nastąpił opływ analizowanej półsfery charakteryzujący się powiększaniem obszaru zwiększonego ciśnienia (rys. 8c). W końcowym etapie badań, po czasie $5,6 \text{ E-5 s}$, nastąpiło obniżenie wartości ciśnienia w obszarze Eulera na skutek wypływu.

Przebieg zmiany siły działającej na półsferę przedstawiono na rysunku 9. Maksymalna wartość siły oddziałującej na półsferę wyniosła 250 kN. Różnica pomiędzy wynikami uzyskanymi eksperymentalnie a wynikami uzyskanymi z analizy numerycznej wyniosła 10%.

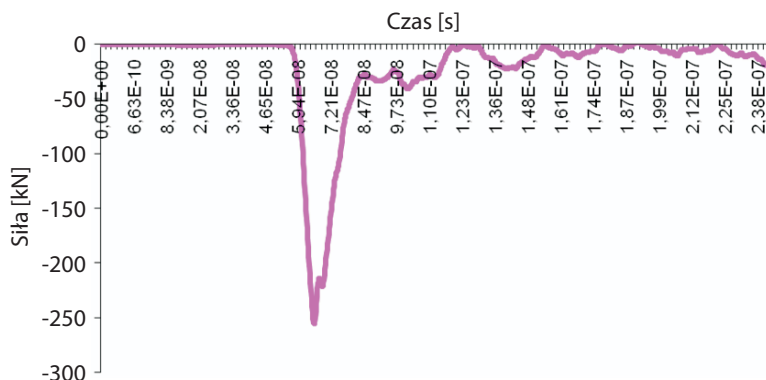
W kolejnych krokach obliczeń, przykładowo dla czasu $5,11 \text{ E-5 s}$, nastąpił opływ analizowanej półsfery charakteryzujący się powiększaniem obszaru zwiększonego ciśnienia (rys. 8b). W końcowym etapie badań, po czasie $5,6 \text{ E-5 s}$, nastąpiło obniżenie wartości ciśnienia w obszarze Eulera na skutek wypływu (rys. 8c).



Rys. 8. Kolejne fazy fali ciśnienia swobodnie rozchodzącej się w powietrzu

Przebieg zmiany siły działającej na półsferę przedstawiono na rysunku 9. Maksymalna wartość siły oddziaływającej na półsferę wyniosła 250 kN. Różnica pomiędzy wynikami uzyskanymi eksperymentalnie a wynikami uzyskanymi z analizy numerycznej wyniosła 10%.

Charakter impulsu siły reakcji półsfery uzyskany w sposób doświadczalny jest zbliżony do wykresu uzyskanego w sposób numeryczny. Świadczy to o dość dobrym sposobie zamodelowania zjawiska rozchodzenia się i odbicia impulsu ciśnienia od półsfery.



Rys. 9. Przebieg zmian obciążenia półsfery wykonanej z kompozytu szklanego uzyskany w sposób numeryczny

W porównaniu z innymi obiektami geometrycznymi półsfery mają niewątpliwą zaletę polegającą na tym, iż niezależnie od miejsca występowania wybuchu ciśnienie działa na półsferę tylko w kierunku normalnym w obszarze zbliżonym do punktowego. Wyniki symulacji będą przydatne przy doborze rodzajów i parametrów warstw energochłonnych EPO. Będą także użyteczne w badaniach, których celem będzie określenie optymalnych parametrów struktur energochłonnych do wykorzystania w ochronie pojazdów opancerzonych.

5. Wnioski

Prezentowane badania stanowią kolejny etap pracy nad koncepcją struktur ochronnych obiektów obciążonych falą uderzeniową. Coraz większą rolę w analizie zjawisk towarzyszących zderzeniom oraz wybuchom odgrywają komputerowe techniki symulacyjne. Umożliwiają one znaczne obniżenie kosztów i podniesienie efektywności badań poprzez dostarczenie danych, których nie można zmierzyć eksperymentalnie. Istotna jest kalibracja i weryfikacja modeli obliczeniowych na podstawie danych eksperymentalnych oraz badań analitycznych. Modele numeryczne sprawdzone dla wybranych stanów konstrukcji pozwolą prowadzić analizy dla innych stanów.

W niniejszej pracy przedstawiono doświadczalno-numeryczną analizę elementu energochłonnego w postaci półsfery kompozytowej, z weryfikacją eksperymentalną.

Planowane są dalsze symulacje numeryczne procesu uderzenia dla różnych konfiguracji warstw elementów oraz paneli energochłonnych przy różnych wielkościach ładunków.

Pozwoli to na dogłębne zapoznanie się z charakterem deformacji i energochłonnością proponowanego rozwiązania panelu ochronnego dla wielu spodziewanych w praktyce wojskowej sytuacji.

Kolejnym etapem badań będzie rozważanie modyfikacji istniejących konstrukcji pojazdów w celu podniesienia ich właściwości energochłonnych poprzez zastosowanie elementów o zmienionych profilach oraz nowych struktur zdolnych pochłonąć większą ilość energii, dodatkowo wzmocnionych pianami metalicznymi. Wybrane przypadki modeli numerycznych zostaną zweryfikowane w sposób doświadczalny, co pozwoli na wiarygodną i kompleksową analizę wytrzymałości całej konstrukcji energochłonnej podczas wybuchu. Proponowana metoda oparta na badaniach numerycznych pozwoli na wyeliminowanie kosztownych i długotrwałych badań rzeczywistych obiektów. Otrzymane wyniki posłużą jako wytyczne do opracowania metodyki badania tego typu struktur i będą mogły być wykorzystywane w dalszych pracach badawczych w zakresie zwiększenia poziomu bezpieczeństwa załóg pojazdów wojskowych. Końcowym etapem badań będzie połączenie modelu pojazdu obciążonego IED z modelem gruntu w celu zbadania zjawisk odbicia i rozchodzenia się fal.

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

LITERATURA

- [1] R. KRZEWIŃSKI, R. REKRUCKI, *Roboty budowlane przy użyciu materiałów wybuchowych*, Polcen, 2005.
- [2] S. DOBROCIŃSKI, *Stabilność rozwiązań zagadnień odporności udarowej konstrukcji*, AMW, Gdynia, 2000.
- [3] A. MORKA, J. WEKEZER, *Modelowanie oddziaływania wybuchu na konstrukcję budynku*, IX Konferencja Naukowo-Techniczna, Programy MES w komputerowym wspomaganii analizy, projektowania i wytwarzania, Giżycko, 2005.
- [4] *MSC.Dytran Example problems*, Wydawnictwo MSC, 2002.
- [5] E. WŁODARCZYK, *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa, 1994.
- [6] K. P. STANIUKOWICZ, *Fizyka wżrywa*, Moskwa, 1975.
- [7] S. OCHELSKI, *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*, WNT, 2004.
- [8] R. KRZEWIŃSKI, *Dynamika Wybuchu. Część I. Metody określania obciążeń*, Wydawnictwo WAT, Warszawa, 1982.
- [9] *MSC.Dytran Theory Manual*, Version 2005, MSC.Software C.O., 2005.
- [10] T. NIEZGODA, W. BARNAT, A. MORKA, *Walidacja modelu fali uderzeniowej w różnych aspektach*, Górnictwo Odkrywkowe, 4-5, 2008.

W. BARNAT, R. GIELETA, T. NIEZGODA

**Numerical and experimental research on the influence of an obstacle
on pressure distribution**

Abstract. This paper deals with research results on the modeling of a blast wave and a half sphere configuration. Numerical and analytic methods were used to examine a blast wave. In order to verify the obtained results a stand for experimental tests was built.

Keywords: blast wave, security, half sphere

Universal Decimal Classification: 536.46