

ANALIZA PARAMETRÓW FALI UDERZENIOWEJ WYBUCHU WYZNACZANYCH EMPIRYCZNIE I Z WYKORZYSTANIEM ULTRASZYBKIEJ KAMERY OPTYCZNEJ

PIOTR SASKA, EDYTA KRZYSTAŁA, JERZY CZMOCHOWSKI

Wydział Nauk o Bezpieczeństwie, Wyższa Szkoła Oficerska Wojsk Lądowych im. gen. T. Kościuszki

e-mail: p.saska@wso.wroc.pl

Katedra Mechaniki Stosowanej, Politechnika Śląska

e-mail: Edyta.Krzystala@polsl.pl

Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Politechnika Wrocławska

e-mail: jerzy.czmochowski@pwr.wroc.pl

Streszczenie. Zasadniczymi parametrami charakterystyki fali uderzeniowej wybuchu, wpływającymi na powstawanie zagrożeń dla otoczenia oraz określającymi jej mechaniczne oddziaływanie, są: impuls nadciśnienia i nadciśnienie fali uderzeniowej. Dodatkowymi parametrami są także prędkość przemieszczania się czoła fali uderzeniowej, gęstość i temperatura produktów wybuchu. Wielkość wymienionych charakterystyk zależy między innymi od masy ładunku wybuchowego, jego kształtu, właściwości fizykochemicznych oraz miejsca ustawienia i sposobu detonacji. Obecnie istnieje szereg metod wyznaczania charakterystyk fali podmuchowej, zarówno analitycznych, doświadczalnych oraz numerycznych. Ze względu na wciąż rosnącą liczbę ofiar ponoszonych przez wojska NATO, spowodowanych eksplozją ładunków wybuchowych, badania w tym kierunku zintensyfikowano. W artykule, na podstawie zależności empirycznych, oszacowano nadciśnienie i impuls nadciśnienia fali uderzeniowej wybuchu generowany przez detonację ładunku o masie kilku kilogramów TNT, umieszczonego w gruncie pod pojazdem. Ponadto przeprowadzono analizę prędkości czoła fali uderzeniowej wybuchu na podstawie zarejestrowanego obrazu za pomocą ultraszybkiej kamery optycznej podczas kontrolowanego wybuchu ładunku pod pojazdem.

1. WSTĘP

Wprowadzenie na wyposażenie wojsk Paktu Północnoatlantyckiego, biorących udział w konflikcie afgańskim, pojazdów opancerzonych kategorii MRAP (ang. Mine Resistant Ambush Protected) oraz innych wozów bojowych zapewniających ochronę żołnierzom przed improwizowanymi urządzeniami wybuchowymi (IED) oraz minami lądowymi w znacznym stopniu zwiększyło bezpieczeństwo prowadzenia przez nich działań bojowych. Rebelianci nie zaprzestali jednak skutecznego atakowania przemieszczających się kolumn wojskowych pojazdów z użyciem ładunków wybuchowych. Według [8] w 2010 r. w Afganistanie wskutek eksplozji improwizowanych urządzeń wybuchowych zginęło 368 żołnierzy koalicji, co stanowi 58,41% wszystkich ofiar w tym roku. W porównaniu do roku 2009, w którym straciło

życie 275 żołnierzy, w roku 2010 liczba ofiar wzrosła o 25%. Sytuacja ta dowodzi, że ciągle istnieje potrzeba poszukiwania rozwiązań konstrukcyjnych podnoszących odporność pojazdów wojskowych na generowaną przez wybuch falę uderzeniową. Impuls nadciśnienia i nadciśnienie fali uderzeniowej wybuchu są zasadniczymi charakterystykami, wpływającymi na powstawanie zagrożeń dla otoczenia oraz określającymi jej mechaniczne oddziaływanie. Parametry te można wyznaczyć na wiele sposobów. Najbardziej pożądane są badania eksperymentalne, prowadzone w warunkach zbliżonych do rzeczywistych z wykorzystaniem ładunków wybuchowych o właściwościach analogicznych do używanych przez bojowników podczas atakowania sił koalicyjnych. Próby tego typu ze względu na różnorodność stosowanych środków, ich dostępność oraz niszczący charakter samego eksperymentu są przeprowadzane tylko w wyspecjalizowanych ośrodkach badawczych posiadających odpowiednie uprawnienia i środki finansowe. Do bezpośredniego pomiaru ciśnienia fali uderzeniowej, generowanej w trakcie eksplozji min lądowych i improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED), używane są czujniki ciśnienia fali padającej i fali odbitej. Prędkość czoła fali wyznacza się, wykorzystując ultraszybką kamerę optyczną. Uzyskane wyniki można zweryfikować poprzez zależności analityczne, pozwalające oszacować główne parametry fali podmuchowej.

2. OPIS OBIEKTU BADAŃ

Badania zostały przeprowadzone na prototypie pojazdu minoodpornego klasy M - ATV (ang. MRAP All-Terrain Vehicle) G-10 firmy Germaz (rys. 1). Pojazd przeznaczony jest do przewozu 10 członków załogi, realizujących zadania rozpoznawcze, patrolowe lub zabezpieczające w strefie bezpośredniego oddziaływania przeciwnika. M-ATV G-10 został zbudowany na podstawie podwozia samochodu terenowego Mercedes Benz UNIMOG U 5000 w wersji militarnej. Nadwozie wykonane jest z blachy pancernej. Ściany boczne pochylone są na kształt „Diamond – Shape”, dzięki czemu pojazd posiada zwiększoną odporność balistyczną na przebicie pocisków [3, 4]. Minoodporność konstrukcji zapewnia wyprofilowana w kształcie litery „V” podłoga przedziału załogowego zintegrowana z samonośnym nadwoziem. Dzięki takiej formie dna pojazdu, zwiększającej kąt pomiędzy kierunkiem padania fali a powierzchnią pancerza, energia fali uderzeniowej wybuchu, generowana przez eksplozję miny lub IED, jest rozpraszana oraz nie ulega odbiciu od gruntu.



Rys. 1. Demonstrator technologii M-ATV G-10 podczas prób poligonowych

Fala uderzeniowa powstała na skutek detonacji ładunku wybuchowego pod podwoziem w pierwszej kolejności obciąża mosty napędowe, następnie spód nadwozia. W tym miejscu, dzięki właściwemu ukształtowaniu podłogi, fala podmuchowa kieruje się na boki, uderzając już ze znacznie mniejszą energią w pojemniki do przewozu wyposażenia oraz koła pojazdu.

Próby poligonowe przeprowadzono na demonstratorze technologii zgodnie z obowiązującymi przepisami i normami określającymi miejsce założenia, sposób oraz masę ładunku wybuchowego. Podczas eksperymentu wyznaczono ciśnienie fali uderzeniowej wybuchu, swobodnej i odbitej oraz całkowity impuls ciśnienia, generowany przez eksplozję ładunków wybuchowych o masie 8 i 10 kg. Wymienione parametry obliczono dla charakterystycznych miejsc pojazdu, narażonych bezpośrednio na oddziaływanie wybuchu, tj. pojemniki zamontowane z boku pojazdu, mosty napędowe, ramę pojazdu oraz wierzchołek wyprofilowanej w kształcie litery „V” podłogi. Odległość od centrum ładunku wybuchowego do tych elementów wynosiła: 0,36 m, 0,62 m, 0,84 m, 1,04 m, 1,20 m.

3. WYNIKI BADAŃ

Charakterystyki fali uderzeniowej wybuchu wyznaczono z wykorzystaniem istniejących w literaturze zależności. Do przeprowadzenia obliczeń ciśnienia fali swobodnej zastosowano wzory Brode'a oraz Henrycha [1, 2, 5, 6]:

$$\begin{aligned} \Delta p^+ &= 1,38\bar{R}^{-1} + 0,543\bar{R}^{-2} - 0,0035\bar{R}^{-3} && \text{dla } 0,05 \leq \bar{R} \leq 0,3 \text{ m/kg}^{1/3} \\ \Delta p^+ &= 0,607\bar{R}^{-1} + 0,032\bar{R}^{-2} - 0,209\bar{R}^{-3} && \text{dla } 0,3 \leq \bar{R} \leq 1,0 \text{ m/kg}^{1/3} \\ \Delta p^+ &= 0,065\bar{R}^{-1} + 0,397\bar{R}^{-2} - 0,322\bar{R}^{-3} && \text{dla } 1,0 \leq \bar{R} \leq 10,0 \text{ m/kg}^{1/3} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Delta p^+ &= 14,071\bar{R}^{-1} + 5,5397\bar{R}^{-2} - 0,03572\bar{R}^{-3} + 0,00625\bar{R}^{-4} && \text{dla } 0,05 \leq \bar{R} \leq 0,3 \text{ m/kg}^{1/3} \\ \Delta p^+ &= 6,1938\bar{R}^{-1} - 0,3262\bar{R}^{-2} + 2,1324\bar{R}^{-3} && \text{dla } 0,3 \leq \bar{R} \leq 1,0 \text{ m/kg}^{1/3} \\ \Delta p^+ &= 0,662\bar{R}^{-1} + 4,05\bar{R}^{-2} + 3,88\bar{R}^{-3} && \text{dla } 1,0 \leq \bar{R} \leq 10,0 \text{ m/kg}^{1/3} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

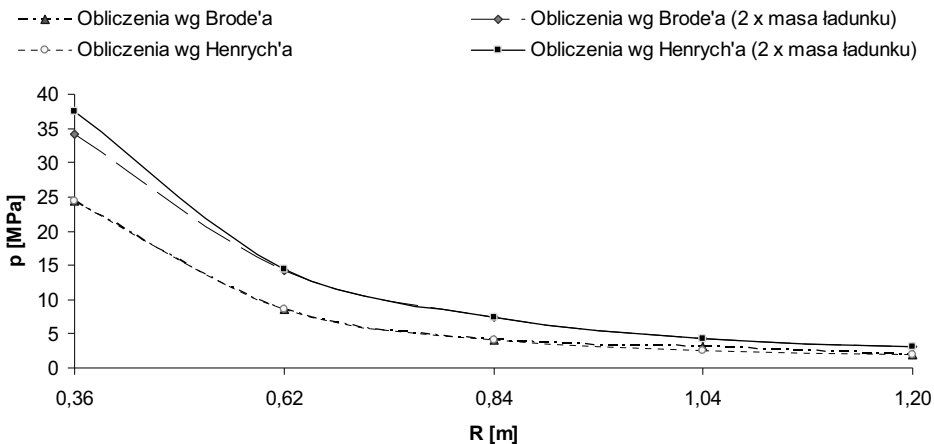
Δp^+ - maksymalne nadciśnienie w [MPa],

\bar{R} - zredukowana odległość w [m/kg^{0,33}].

Ze względu na umieszczenie ładunku wybuchowego na powierzchni stałej (ziemia) masę trotylu przyjętą do obliczeń wartości ciśnienia fali swobodnej zwiększono dwukrotnie w stosunku do masy rzeczywistej [7]. Wartości ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu (swobodnej) generowanej z ładunku 8 kg i 10 kg TNT przedstawiono w tabelach 1÷2 oraz graficznie na rysunkach 2÷3

Tabela 1. Wartości ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu (swobodnej) generowanej z ładunku 8 kg TNT wyznaczone empirycznie

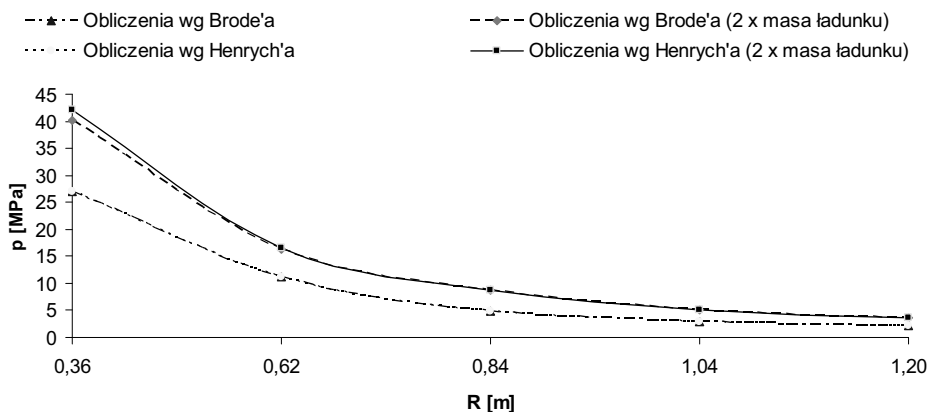
Lp.	Odległość ładunku MW [m]	Wartości teoretyczne ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu według [MPa]			
		Brode'a	Brode'a (dwukrotna masa ładunku)	Henrycha	Henrycha (dwukrotna masa ładunku)
1.	0,36	24,34	34,23	24,41	37,56
2.	0,62	8,64	14,25	8,64	14,42
3.	0,84	4,08	7,36	4,08	7,36
4.	1,04	3,04	4,32	2,53	4,32
5.	1,20	1,89	3,07	1,89	3,08



Rys. 2. Wielkości ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu (swobodnej) w funkcji odległości od miejsca wybuchu dla ładunku o masie 8 kg

Tabela 2. Wartości ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu (swobodnej) generowanej z ładunku 10 kg TNT wyznaczone empirycznie

Lp.	Odległość ładunku MW [m]	Wartości teoretyczne ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu według [MPa]			
		Brode'a	Brode'a (dwukrotna masa ładunku)	Henrycha	Henrycha (dwukrotna masa ładunku)
1.	0,36	27,01	40,13	27,06	42,16
2.	0,62	11,19	16,21	11,28	16,44
3.	0,84	4,87	8,71	4,87	8,71
4.	1,04	2,97	5,09	2,97	5,09
5.	1,20	2,19	3,63	2,19	3,63



Rys. 3. Wielkości ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu (swobodnej) w funkcji odległości od miejsca wybuchu dla ładunku o masie 10 kg

Po wyznaczeniu wartości ciśnienia fali uderzeniowej swobodnej obliczono ciśnienie fali uderzeniowej odbitej od elementów konstrukcyjnych pojazdu, poddanych jej działaniu.

Założono, że obciążane podzespoły są nieodkształcalnymi ciałami stałymi, od których odbija się fala uderzeniowa. Przyjęcie takiego aksjomatu usprawiedliwione było dużą różnicą w gęstościach większości ciał stałych i ośrodka gazowego, w którym propaguje się fala uderzeniowa [7]. Wielkości ciśnienia fali odbitej oszacowano za pomocą następującego wzoru [4, 7]:

$$\Delta p_r = \frac{8\Delta p_i^2 + 1,4\Delta p_i}{\Delta p_i + 0,7} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

gdzie

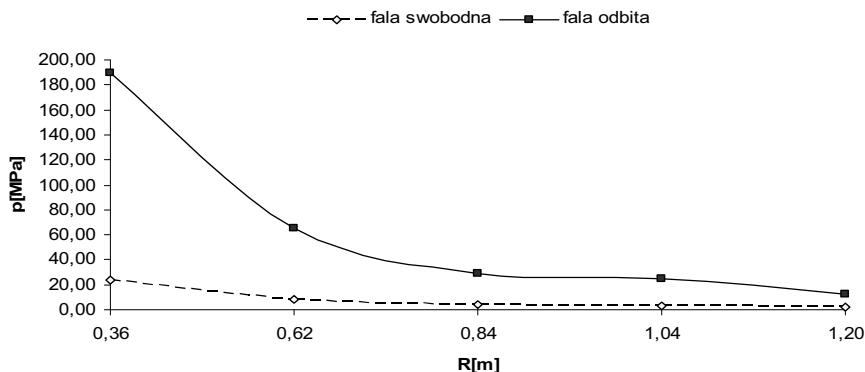
Δp_r – maksymalne nadciśnienie fali odbitej;

Δp_i – maksymalne nadciśnienie fali uderzeniowej swobodnej;

Wartości ciśnienia fali odbitej oraz fali swobodnej generowanej z ładunku 8 kg i 10 kg TNT przedstawiono w tabelach 3÷4 oraz graficznie na rysunkach 4÷5

Tabela 3. Wartości ciśnienia fali swobodnej i fali odbitej generowanej z ładunku 8 kg TNT, wyznaczone empirycznie

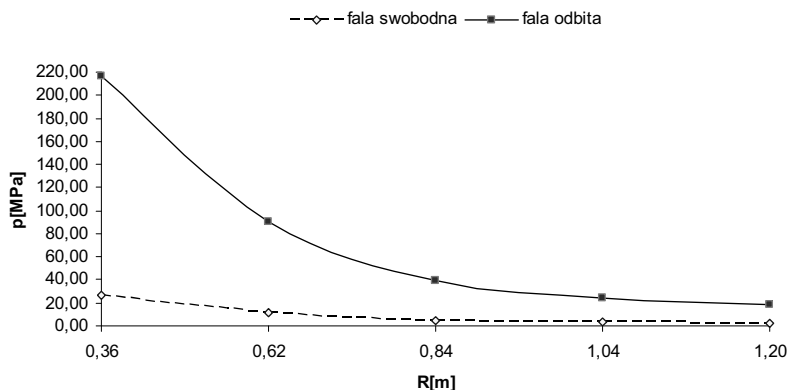
Lp.	Odległość ładunku MW [m]	Wartość ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu [MPa]	
		fala swobodna	fala odbita
1.	0,36	24,34	190,00
2.	0,62	8,64	65,00
3.	0,84	4,08	29,05
4.	1,04	3,04	25,14
5.	1,20	1,89	12,05



Rys. 4. Wielkości ciśnienia fali swobodnej i fali odbitej w funkcji odległości od miejsca wybuchu dla ładunku o masie 8 kg

Tabela 4. Wartości ciśnienia fali swobodnej i fali odbitej generowanej z ładunku 10 kg TNT, wyznaczone empirycznie

Lp.	Odległość ładunku MW [m]	Wartość ciśnienia fali uderzeniowej wybuchu [MPa]	
		fala swobodna	fala odbita
6.	0,36	27,01	216,00
7.	0,62	11,19	90,35
8.	0,84	4,87	39,78
9.	1,04	2,97	24,57
10.	1,20	2,19	18,33



Rys. 5. Wielkości ciśnienia fali swobodnej i fali odbitej w funkcji odległości od miejsca wybuchu dla ładunku o masie 10 kg

Ostatnim obliczanym empirycznie parametrem był impuls całkowity. Podobnie jak wielkości fali odbitej, impuls obliczany był na podstawie założenia, że materiał, na który oddziałuje wybuch, jest nieodkształcalny. Wartość całkowitego impulsu wyznaczano na podstawie wzoru (4):

$$I_r = A \frac{\sqrt[3]{m_T^2}}{R} [MP \cdot s] \quad \bar{R} \geq 0,5 \quad (4)$$

gdzie:

I_r – impuls całkowity;

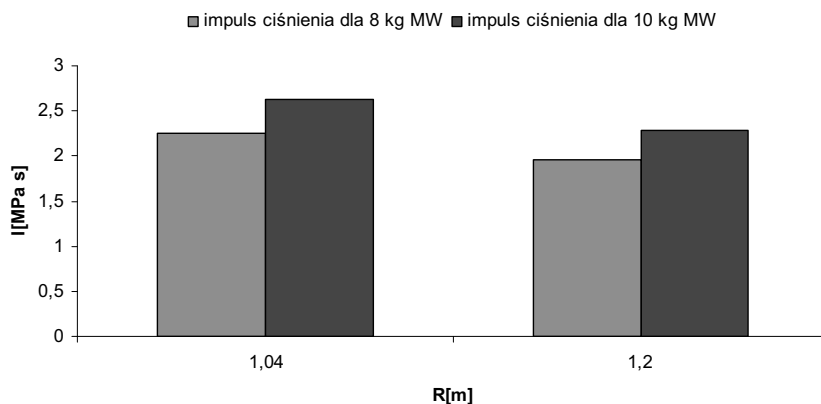
$A = (0,49 \div 0,59) 10^{-3} \text{ MPa} \cdot \text{s} / \text{kg}^2 / \text{m}^3$;

R – odległość od centrum ładunku [m];

m – masa ładunku trotylowego [kg].

\bar{R} - zredukowana odległość w $[\text{m}/\text{kg}^{0,33}]$.

Z uwagi na to, że wartość \bar{R} dla odległości 0,36 m, 0,62 m, 0,84 m od centrum ładunku wybuchowego była mniejsza niż 0,5, impuls całkowity obliczono jedynie dla 1,04 m i 1,20 m (rys. 6).



Rys. 6. Wartość całkowitego impulsu ciśnienia w odległości od miejsca wybuchu 1,04m i 1,20m

4. ANALIZA PRĘDKOŚCI CZOŁA FALI UDERZENIOWEJ WYBUCHU

Do wyznaczania charakterystyk fali uderzeniowej wybuchu bardzo często wykorzystywane są metody optyczne. W przypadku detonacji ładunków wybuchowych o większej masie metody te dają możliwość wykonania precyzyjnego pomiaru z bezpiecznej odległości. W metodzie tej zastosowanie znajdują ultraszybkie kamery optyczne (rys. 7), a ich zastosowanie pozwala na pomiar przemieszczenia i odkształcenia obiektu obciążanego falą w wielu punktach jednocześnie. Dodatkowo można zmierzyć prędkość i przyspieszenia liniowe oraz kątowe poprzez analizę informacji wizyjnej.



Rys. 7 Ultraszybka kamera optyczna na stanowisku pomiarowym

Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono przykład zastosowania szybkiej kamery do wyznaczenia prędkości fali. Analizę prędkości wykonano na podstawie zarejestrowanego obrazu za pomocą ultraszybkiej kamery optycznej o częstotliwości próbkowania 10 000 Hz. Metoda pomiaru prędkości fali uderzeniowej polegała na zmierzeniu czasu przejścia czoła odbitej fali uderzeniowej na znanej odległości. W celu uproszczenia obliczeń kierunek ruchu analizowanego punktu czoła fali jest równoległy do powierzchni.

W pierwszej kolejności analizowano prędkość czoła fali uderzeniowej w trakcie kontrolowanego wybuchu 8 kg ładunku TNT pod kołem pojazdu. Proces rozchodzenia się fali uderzeniowej generowanej w wyniku wybuchu przedstawiono na rys. 8. Wyniki zmiany prędkości czoła fali uderzeniowej zestawiono w tabeli 5.



Rys. 8. Wyznaczanie prędkości czoła fali uderzeniowej wybuchu w trakcie eksplozji ładunku o masie 8 kg

Tabela. 5 Wyniki oszacowanej zmiany wartości prędkości czoła fali uderzeniowej generowanej w wyniku wybuchu ładunku TNT pod pojazdem

Masa Ładunku TNT [kg]	Całkowity czas rejestracji [ms]	Czas [ms]	Prędkość $\approx V$ [m/s]
8	21	1,6	732,7

8	21	2,2	549,5
8	21	3,3	457,9
8	21	5,0	403,2
8	21	6,0	393,8
10	26	2,8	573,6
10	26	3,2	478,02
10	26	5,0	458,9
10	26	6,5	430,7
10	26	7,5	420,2

Rys. 9 przedstawia proces rozchodzenia się fali uderzeniowej generowanej w wyniku wybuchu 10 kg TNT pod pojazdem, a dokładnie pod jego kadłubem. Zaznaczono również kierunek ruchu analizowanego punktu. Wyniki zmiany prędkości czoła fali uderzeniowej dla 10 kg ładunku przedstawiono w tabeli 5.



Rys. 9 Wyznaczanie prędkości czoła fali uderzeniowej wybuchu w trakcie eksplozji ładunku o masie 10 kg TNT pod kadłubem pojazdu

Wyniki przeprowadzonej analizy i oszacowanych wartości prędkości potwierdzają, że z upływem czasu prędkość fali uderzeniowej maleje. Metody optyczne pozwalają również uwzględnić wszystkie towarzyszące eksplozji zjawiska, takie jak wielokrotne odbicie fali, uderzenie fali w obiekt pod kątem różnym od prostego, wpływ sposobu umieszczenia ładunku w podłożu na charakterystyki fali uderzeniowej wybuchu.

5. WNIOSKI

Parametrami fali uderzeniowej powodującymi powstawanie zagrożeń dla konstrukcji pojazdów oraz załóg są: impuls nadciśnienia i nadciśnienie fali uderzeniowej. Prawidłowe ich wyznaczenie ma zasadnicze znaczenie podczas projektowania układów i elementów konstrukcyjnych, jak i całego pojazdu przewidzianego do wykorzystania w trakcie działań bojowych.

Przedstawione w pracy badania empiryczne pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- obliczone wartości zasadniczych charakterystyk fali uderzeniowej wybuchu są w dużej części zgodne z przewidywaniami oraz z odczytami z urządzeń pomiarowych;
- uzyskane wielkości parametrów fali uderzeniowej swobodnej i odbitej pozwalają stwierdzić, że będą one w znacznym stopniu obciążać konstrukcję pojazdu, powodując uszkodzenia niektórych jej elementów;
- zależności empiryczne umożliwiają oszacowanie maksymalnego ciśnienia fali swobodnej i odbitej oraz impulsu ciśnienia, jednak przy badaniu odpowiedzi konstrukcji na działanie

fali uderzeniowej wymagana jest znajomość czasowej zależności obciążającego nadciśnienia na powierzchni obiektu;

- wyniki przeprowadzonej analizy i oszacowanych wartości prędkości potwierdzają, iż z upływem czasu prędkość fali uderzeniowej maleje.
- metody optyczne wykorzystujące ultraszybkie kamery pozwalają wyznaczyć takie wielkości jak: przemieszczenie, prędkość i przyspieszenie.
- ultraszybka kamera optyczna daje możliwość analizowania procesu przemieszczania się swobodnej fali uderzeniowej w powietrzu oraz fali odbitej od podłoża i dolnej części pojazdu.

LITERATURA

1. Barnat W.: Wybrane problemy energochłonności nowych typów paneli ochronnych obciążonych falą wybuchu. Warszawa: Wyd. Bel Studio, 2010.
2. Henrych J: The dynamics of explosions and its use. Prague: Academia Prague, 1979.
3. Iluk A.: Koncepcja opancerzonego samochodu patrolowego. „Górnictwo Odkrywkowe” 2010, nr 4, s. 116-120.
4. Saska P., Czmochoński J.: Problemy oddziaływania wybuchu na pojazdy MRAP. Wrocław: WSOWL, 2010. Zesz. Nauk. WSOWL 2010, nr 4, s. 219-235.
5. Saska P., Czmochoński J., Iluk A.: Przegląd sposobów wyznaczania parametrów fali uderzeniowej wybuchu. „Górnictwo Odkrywkowe” 2010, nr 4, s. 187-192.
6. Smith P. D., Hetherington J. G.: Blast and ballistic loading of structures. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1994.
7. Trzciniński W. A., Paszula J., Trębiński R.: Badanie charakterystyk fali podmuchowej generowanej detonacją cylindrycznego ładunku kruszącego materiału wybuchowego. „Biuletyn WAT” 2003, nr 2, s. 45-62.
8. [online]. [dostęp: 2011]. Dostępny w Internecie: <http://icasualties.org/OEF/index.aspx>

ANALYSIS OF SHOCK WAVE PARAMETERS DETERMINED EMPIRICALLY WITH THE USE OF A HIGH – SPEED CAMERA

Summary. The essential shock wave characteristics are pressure impulse and overpressure of a shock wave. They influence a threat formation for the surrounding. Additional parameters are shock wave front velocity, density as well as temperature of explosion products. The scale of a parameter mentioned above depends on a charge mass, its shape, physical properties, place of arrangement and a way of detonation as well. Currently there exists a number of methods which allow to determine characteristics of a blast wave. These are analytical, experimental as well as numerical methods. To decrease a great number of casualties among NATO soldiers, caused through explosion of charge, research in this discipline was intensified. In the article, based on an empirical dependency, the overpressure and shock wave overpressure impulse of a few kilograms charge blast is estimated. The TNT charge was situated under the vehicle. Moreover shock wave front velocity was analyzed based on registered image from the high-speed camera. The movie was registered during controlled explosion under the vehicle.

