

Janusz ŚLIWIŃSKI¹
Michał LUDAS¹
Ireneusz PLEBANKIEWICZ¹
Cezary ŚLIWIŃSKI¹
Adam KUBECKI¹
Patrycja WOJCIESZYŃSKA¹

ODDZIAŁYWANIE OBCIĄŻEŃ UDAROWYCH NA PRZEGRODY I ŚRODKI TRANSPORTOWE

1. Wstęp

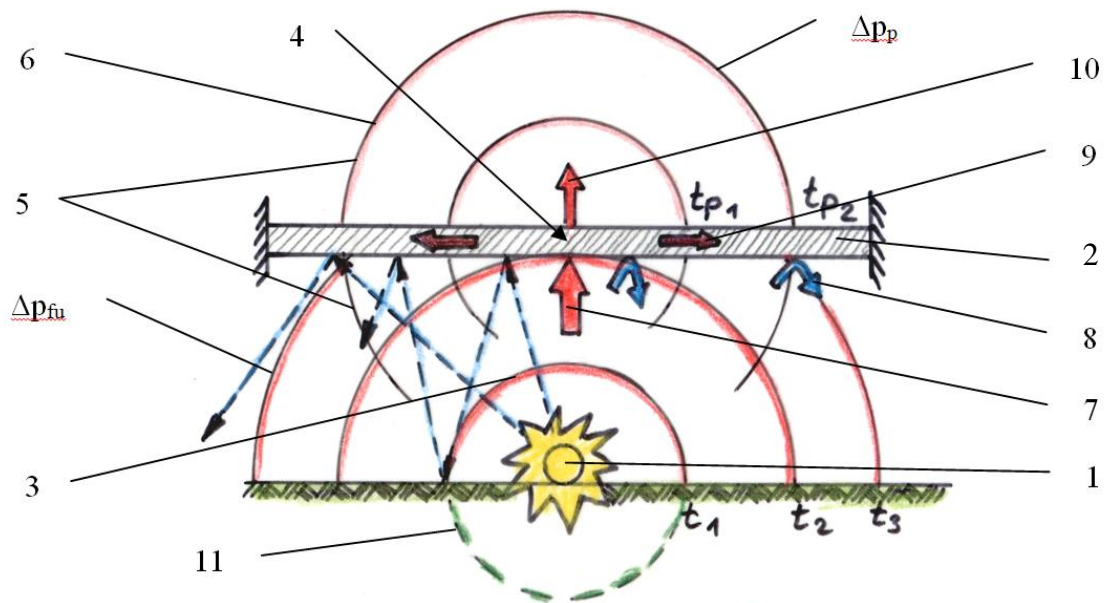
Opracowanie złożonych procesów produkcyjnych, systemów sterowania i regulacji, oraz urządzeń technicznych o złożonej postaci konstrukcyjnej, wymaga stosowania zarówno nowoczesnych technik konstruowania, materiałów konstrukcyjnych, procesów technologicznych, jak również znajomości praw i analogii fizycznych. Ich znajomość umożliwia już na etapie analiz rozwiązanie wielu złożonych problemów konstrukcyjnych. Ważnym zagadnieniem jest znajomość oddziaływania na przegrody obciążeń udarowych zarówno od uderzenia pocisków jak również fal detonacyjnych i uderzeniowych generowanych detonacją materiału wybuchowego. Znajomość powyższych zagadnień jest szczególnie ważna dla potrzeb konstrukcji nowoczesnych środków minersko-zaporowych oraz nowej generacji wozów bojowych i pojazdów patrolowych. Wynika to z stąd, że wozy bojowe i pojazdy patrolowe powinny zapewnić załodze bezpieczeństwo i ergonomiczne warunki prowadzenia działań, poprzez wysoką odporność na działanie różnego typu min i urządzeń IED oraz pocisków. Dlatego też już na etapie konstruowania wozu bojowego i pojazdu patrolowego należy zwrócić szczególną uwagę na konstrukcję kadłuba (kształt, sztywność, opancerzenie), jego zawieszenie, układ jezdny, konstrukcję podłogi oraz konstrukcję i mocowanie siedzisk w przedziale załogi.

2. Oddziaływanie obciążeń udarowych na przegrody nieruchome.

Energia obciążeń udarowych np. fali uderzeniowej pierwotnej generowanej detonacją materiału wybuchowego, oddziałując na przegrody, zostaje przez nie częściowo odbita i pochłonięta oraz jest źródłem nowej sferycznej fali uderzeniowej generowanej przez tę przegrodę tzw. fali uderzeniowej wtórnej. (rys. 1). Fala ta

¹ mgr inż. Wojskowy Instytut Techniki Inżynierskiej im. profesora Józefa Kosackiego

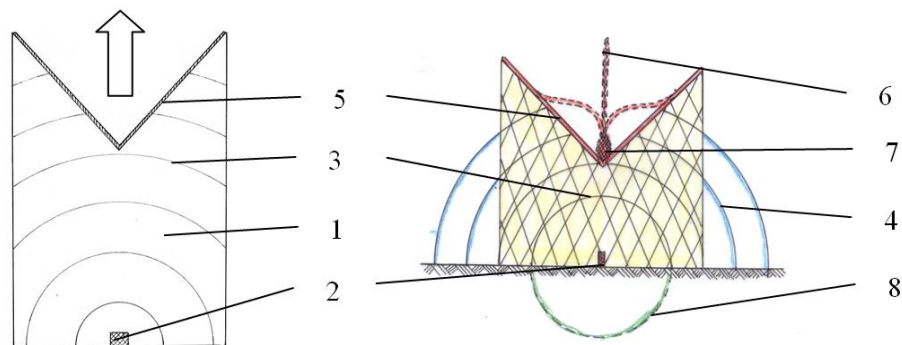
generowana jest przez impuls naprężeń ściskających przechodzących przez przegrodę, który powoduje jej deformację i drgania. W chwili oddziaływania na przegrodę, fala uderzeniowa pierwotna zostaje wyhamowana, co powoduje, że ciśnienie na jej czole znacznie wzrasta. W przypadku przegród sztywnych (np. dno kadłuba wozu bojowego) wartość ciśnienia na czole fali uderzeniowej wyhamowanej jest około dwukrotnie większa niż fali pierwotnej. Ważne znaczenie dla bezpieczeństwa załogi ma również ta część energii fali uderzeniowej wtórnej, która jest przeniesiona przez przegrodę (dno kadłuba) do przedziału załogowego. Fala ta, zwana również falą uderzeniową przeniesioną, oddziałuje bezpośrednio na załogę.



Rys. 1. Schemat oddziaływania wybuchu na przegrodę.

1 – ładunek MW; 2 – przegroda; 3 – fala uderzeniowa pierwotna; 4 – źródło fali uderzeniowej wtórnej; 5 – fala uderzeniowa wtórna; 6 – fala uderzeniowa przeniesiona; 7 – energia fali uderzeniowej wyhamowanej na przegrodzie; 8 – energia fali uderzeniowej odbitej; 9 – energia fali uderzeniowej pochłoniętej; 10 – energia fali uderzeniowej przeniesionej; 11 – fala sejsmiczna; Δp_{fu} – nadciśnienie na czole fali uderzeniowej swobodnej; Δp_p – nadciśnienie na czole fali uderzeniowej przeniesionej

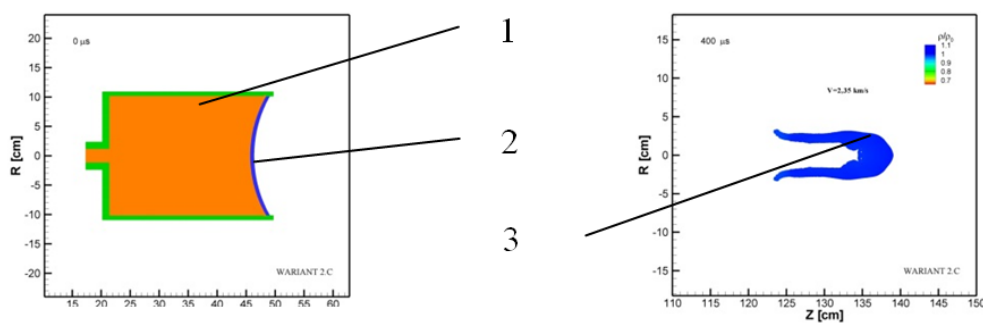
Obciążenia udarowe wywołane oddziaływaniem fali detonacyjnej materiału wybuchowego przylegającego do przegród o odpowiednich parametrach konstrukcyjnych (wkładki kumulacyjne), generują strumień kumulacyjny (rys. 2), lub wybuchowo formowany pocisk (rys. 3).



Rys. 2. Schemat oddziaływania fali detonacyjnej na cienkościenną przegrodę (wkładkę kumulacyjną) w kształcie litery „V”

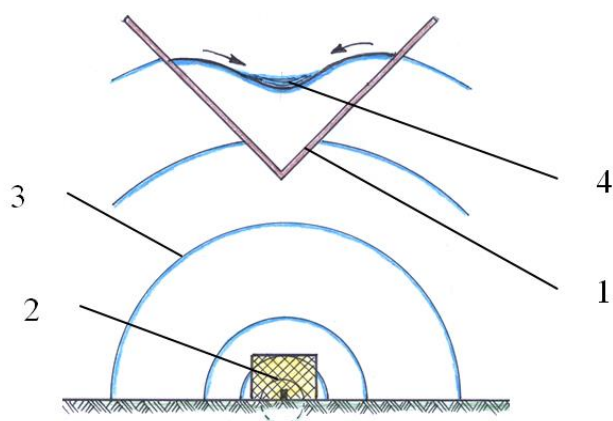
1 – materiał wybuchowy, 2 – inicjator, 3 – fala detonacyjna, 4 – fala uderzeniowa pierwotna, 5 – wkładka kumulacyjna, 6 – strumień kumulacyjny, 7 – zbitek, 8 – fala sejsmiczna

Z kolei obciążenia udarowe wywołane oddziaływaniem fali uderzeniowej na przegrodę cienkościenną o opływowym kształcie (np. dna kadłubów pojazdów), generują falę uderzeniową przeniesioną (rys. 4).



Rys. 3. Przebieg procesu wybuchowego formowania pocisku [1]

1 – materiał wybuchowy, 2 – wkładka kumulacyjna, 3 – pocisk



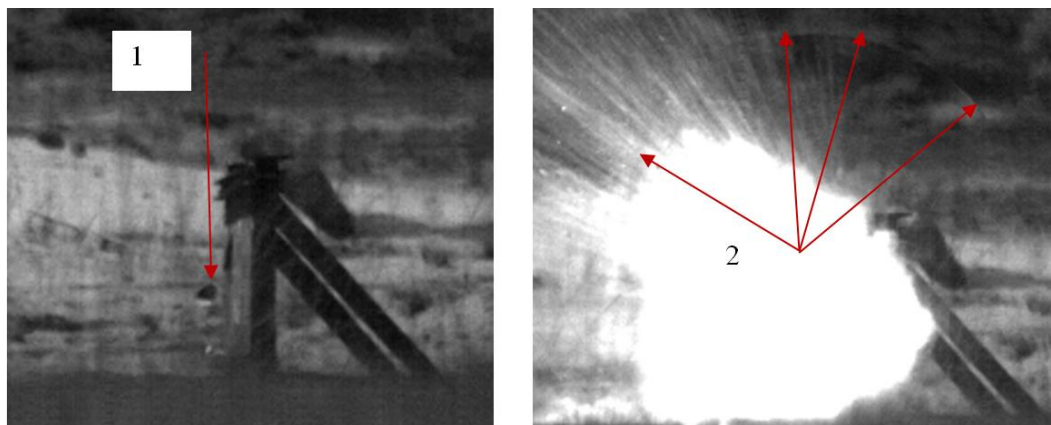
Rys. 4. Fala uderzeniowa przeniesiona o charakterze kumulacyjnym generowana przez cienkościenną przegrodę o opływowym kształcie

1 – przegroda cienkościenna; 2 – ładunek materiału wybuchowego; 3 – fala uderzeniowa pierwotna; 4 – fala uderzeniowa przeniesiona

3. Przykłady oddziaływania obciążeń udarowych na przegrody

3.1. Uderzenie pocisku w grubościenną płaską płytę pancerną

Na rysunku 5 przedstawiono uderzenie pocisku w płytę pancerną oraz falę uderzeniową generowaną przez płytę, rozchodzącą się sferycznie od miejsca uderzenia.

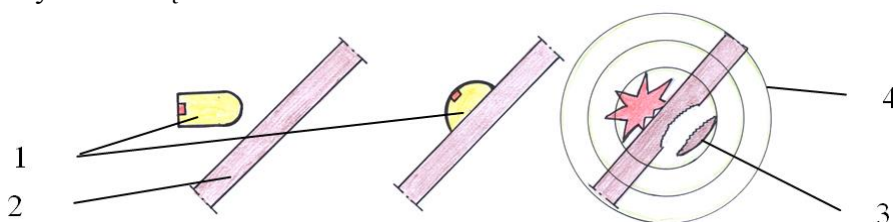


Rys. 5. Fala uderzeniowa wywołana uderzeniem pocisku o masie 2,5 kg (z lewej) lecącego z prędkością 2500 m/s w płytę pancerną o grubości 100 mm i masie 1,3 tony (z prawej).
1 – pocisk, 2 – fala uderzeniowa [2]

W przypadku ostrzelania kadłuba wozu bojowego pociskami, w jego wnętrzu rozchodzić się będą fale uderzeniowe, które oddziaływać będą na załogę. Wartość impulsu fal uderzeniowych zależy będzie od masy pocisku i grubości pancerza. Z reguły masa pocisku jest stosunkowo niewielka (np. kal. 12,7, 24, 30 mm itp.), a kadłub dobrze opancerzony (duża masa), w związku z powyższym generowane wewnątrz kadłuba fale uderzeniowe nie są groźne dla załogi.

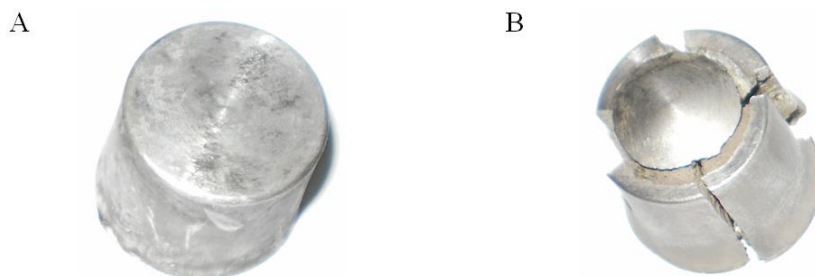
3.2. Detonacja materiału wybuchowego przylegającego do grubościennej płaskiej przegrody

Na rysunku 6 przedstawiono schemat oddziaływania pocisku przeciwpancernoburzącego odkształcalnego HESH na przednią płytę pancerną wozu bojowego [3]. W tym przypadku czynnikiem rażącym załogę jest impuls fali uderzeniowej przeniesionej oraz odłamki kadłuba i oderwanych elementów konstrukcyjnych zamocowanych wewnątrz kadłuba.



Rys. 6. Schemat oddziaływania pocisku typu HESH na grubościenną przegrodę [3]
1 – pocisk, 2 – przegroda, 3 – odłamek przegrody, 4 – fala uderzeniowa

Na rysunku 7 przedstawiono wałek stalowy (gat. 18G2A) poddany oddziaływaniu detonacji materiału wybuchowego z odległości 10 mm (A) i oddziaływaniu detonacji materiału wybuchowego przylegającego do wałka (B).



Rys. 7. Efekt detonacji materiału wybuchowego oddalonego od wałka o 10 mm (A) i przylegającego do wałka (B).

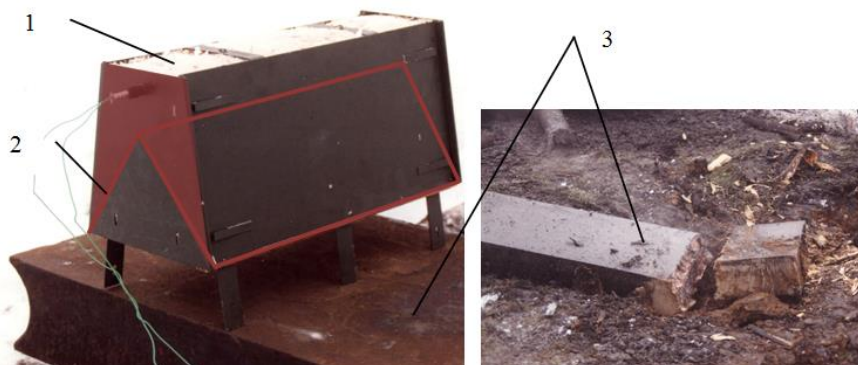
A – odkształcenia plastyczne wałka od strony oddziaływania fali uderzeniowej;
B – fragmentacja wałka

W pierwszym przypadku nastąpiło odkształcenie plastyczne wałka od strony oddziaływania fali uderzeniowej, natomiast w drugim przypadku, pęknięcie i oderwanie górnej części wałka.

3.3. Detonacja materiału wybuchowego przylegającego do cienkościennej przegrody w kształcie litery „V”

Detonacja materiału wybuchowego 1 przylegającego do cienkościennej przegrody 2 kształcie litery „V” (rys. 2 i 8), powoduje dynamiczne obciskanie przegrody 2, a tym samym wytworzenie strumienia kumulacyjnego. Strumień ten w rozpatrywanym układzie wybuchowym jest czynnikiem rażącym, przecinającym płytę pancerną.

W zależności od rodzaju materiału wybuchowego, prędkość fali detonacyjnej wynosi od 7000 m/s do 9000 m/s, natomiast ciśnienie fali detonacyjnej na styku z przegrodą od 20 GPa do 40 GPa.

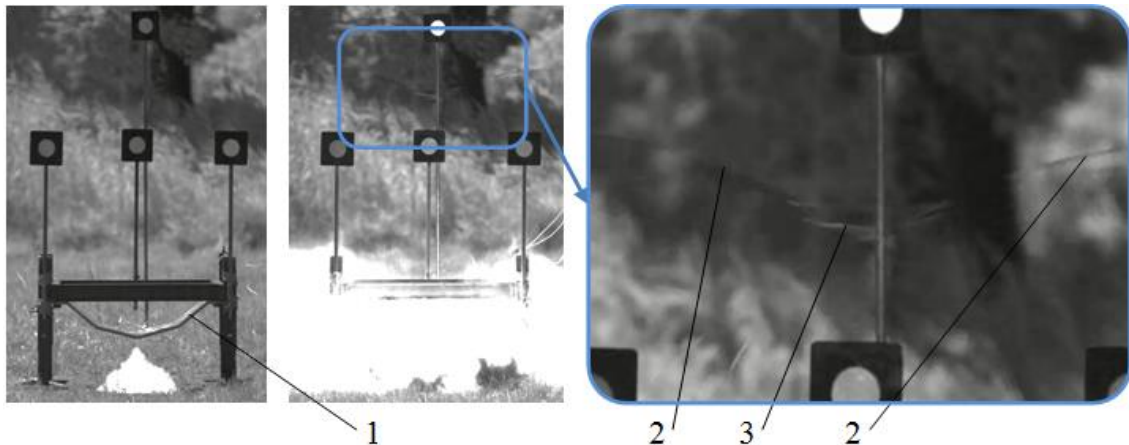


Rys. 8. Efekt oddziaływania na płytę pancerną strumienia kumulacyjnego wytworzonego z przegrody metalowej w kształcie litery „V” (wkładki kumulacyjnej), po detonacji materiału wybuchowego.

1 – materiał wybuchowy, 2 – wkładka kumulacyjna, 3 – płyta pancerna

3.4. Oddziaływanie fali uderzeniowej na przegrodę cienkościenną o opływowym kształcie

Jak już wspomniano, detonacja materiału wybuchowego 1 (rys. 4 i 9) oddziałując z prędkością naddźwiękową na cienkościenną przegrodę metalową o zaokrąglonym kształcie, generuje falę uderzeniową przeniesioną o charakterze kumulacyjnym. Fala ta powoduje przemieszczanie powietrza w kierunku do środka przegrody, z jednoczesnym jego sprężaniem [4, 5 i 6].



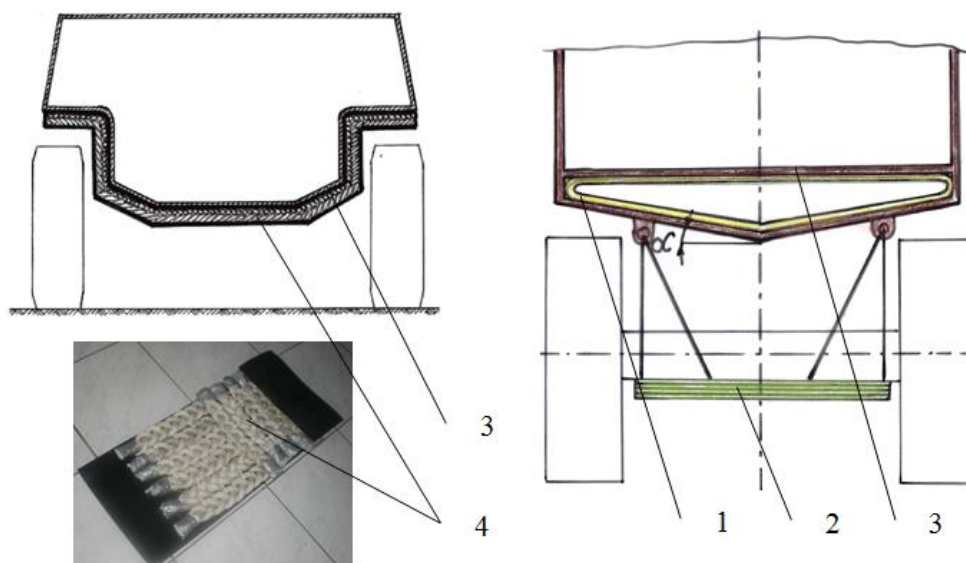
Rys. 9. Fala uderzeniowa przeniesiona o charakterze kumulacyjnym sprężająca powietrze w osi przegrody [4].

1 – przegroda, 2 – fala uderzeniowa, 3 – sprężone powietrze

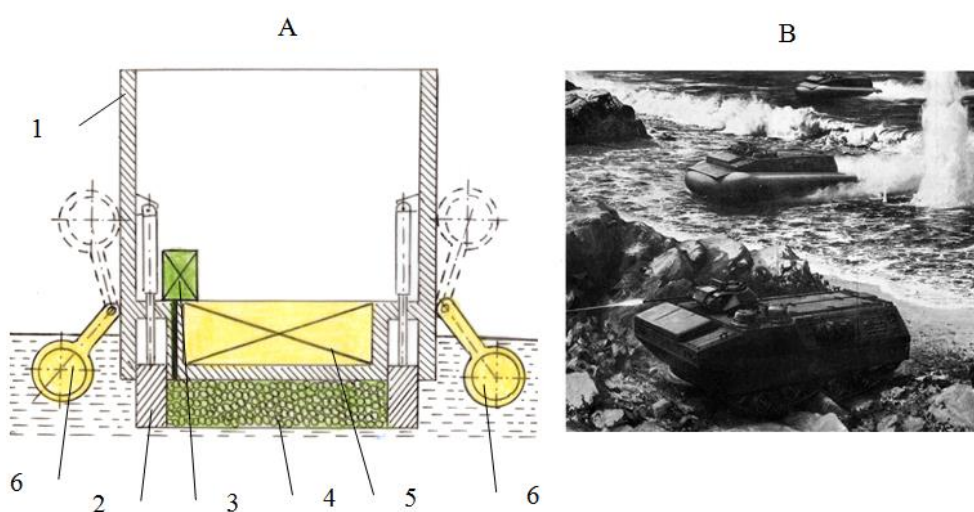
Impuls ciśnienia fali uderzeniowej oddziałującej na przegrodę uzależniony jest od masy i rodzaju materiału wybuchowego oraz od odległości materiału wybuchowego od przegrody.

4. Oddziaływanie fali uderzeniowej na lądowe i pływające środki transportowe

W konstrukcji różnego typu środków transportowych dąży się do maksymalnego ograniczenia skutków oddziaływania fali uderzeniowej na ich kadłuby, a tym samym na załogę. Poszukiwanie rozwiązań konstrukcyjnych oraz tworzenie koncepcji osłon, paneli i innych urządzeń przeciwybuchowych wskazuje na to, że jednym z rozwiązań jest zamontowanie wewnątrz kadłuba środka transportowego pojemnika próżniowego (rys. 10, 11). Wynika to z tego, że fala uderzeniowa jest falą mechaniczną i nie rozchodzi się w próżni. Na rysunku 10 przedstawiono koncepcję transportera opancerzonego z panelem linowym [7] i pojazdu minoodpornego z zestawem przeciwybuchowym [8,9]. Z kolei na rysunku 11 przedstawiono koncepcję środka pływającego o zwiększonej odporności na wybuchy oraz środka pływającego z poduszką powietrzną [10].



Rys. 10. Koncepcja transportera opancerzonego z panelem przeciwybuchowym linowym (z lewej) i pojazdu minoodpornego z zestawem przeciwybuchowym (z prawej)
 1 – pojemnik próżniowy, 2 – osłona elastyczna, wielowarstwowa, 3 – podłoga, 4 – panel linowy



Rys. 11. Koncepcja środka pływającego o zwiększonej odporności na miny (A) oraz amfibii desantowej z poduszką powietrzną (B)
 1 – kadłub, 2 – osłona, 3 – wytwornica pęcherzyków powietrza, 4 – pęcherzyki powietrza, 5 – silnik napędowy, 6 – pędnik strugo wodny

Zaletą powyższej koncepcji środka pływającego (rys.11A) jest to, że utworzona pod jego dnem przestrzeń, która wypełniona jest pęcherzykami powietrza, działa jak amortyzator tłumiąc energię wybuchu miny. Zaletą jest również to, że fala uderzeniowa przemieszczając się przez granice dwóch różnych ośrodków tj. z wody do przestrzeni wypełnionej pęcherzykami powietrza ulega osłabieniu. Z kolei przechodząc przez pęcherzyki powietrza powoduje ich gwałtowne sprężanie, a następnie pęknięcie, co powoduje, że oddziaływają one pulsacyjnie na falę uderzeniową osłabiając jej

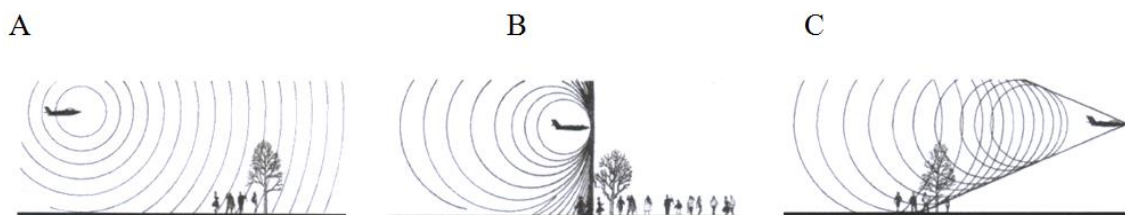
działanie. Powyższe czynniki powodują, że skuteczność rażenia dna środka pływającego jest zdecydowanie (około 3,0 razy) mniejsza. Zaletą jest również to, że utworzona pod dnem przestrzeń wypełniona pęcherzykami powietrza, zwiększa dodatkowo wyporność transportera.

5. Oddziaływanie obciążeń udarowych na powietrzne środki transportowe

Przykładem tego typu obciążeń jest oddziaływanie fal uderzeniowych dźwiękowych na kadłub samolotu podczas pokonywania „bariery dźwięku” oraz w czasie przelotu z prędkością naddźwiękową przez obszar powietrza o podwyższonej gęstości np. chmurę deszczową.

5.1. Przekraczanie bariery dźwięku

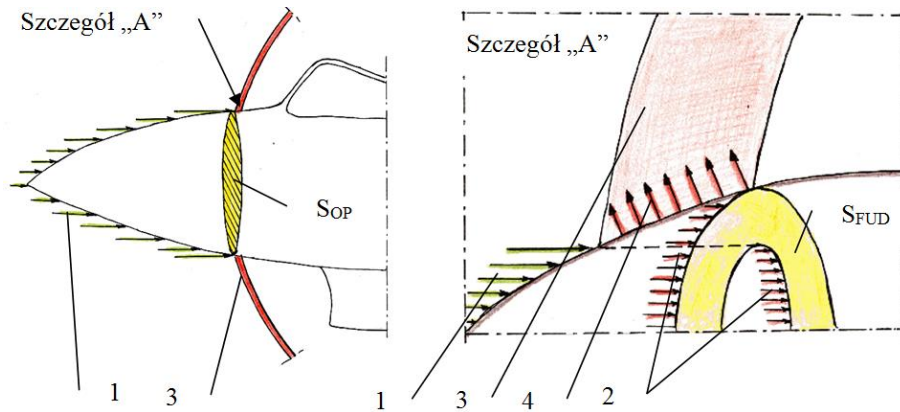
Badania wykazały, że zakłócenia powietrza wywołane przez lecący statek powietrzny oraz hałas jego silników odrzutowych tworzą fale tzw. ciśnieniowe o takim samym charakterze jak fale dźwiękowe [11]. Gdy prędkość statku powietrznego zbliża się do prędkości dźwięku, przed jego dziobem narastają i gęstnieją (nakładają się) fale ciśnieniowe tworząc falę uderzeniową dźwiękową. Fala ta jest więc złożeniem wielu tzw. kulistych fal ciśnieniowych poruszających się z prędkością dźwięku, których obwiednia tworzy tzw. stożek Macha. Tworzenie się fali uderzeniowej przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Generowanie fal ciśnieniowych przez statek powietrzny w czasie lotu z różnymi prędkościami

A – lot samolotu z prędkością poddźwiękową, B – lot samolotu z prędkością dźwięku, C – lot samolotu z prędkością naddźwiękową [11]

W czasie przekraczania przez samolot bariery dźwięku tj. oddziaływania na kadłub samolotu fali uderzeniowej dźwiękowej, opór lotu samolotu jest sumą oporu powietrza oraz oporu falowego wywołanego przez rozpychanie (rozrywanie) fali uderzeniowej dźwiękowej przez dziób i inne elementy konstrukcyjne kadłuba samolotu np. skrzydła (rys. 13).



Rys. 13. Schemat oddziaływania na dziób samolotu siły oporu powietrza i siły oporu falowego
 1 – siła oporu powietrza; 2 – siła oporu falowego; 3 – fala uderzeniowa dźwiękowa;
 4 – siły rozpychające falę uderzeniową dźwiękową przez dziób samolotu;
 S_{OP} – powierzchnia oddziaływania siły naporu powietrza;
 S_{FU} – powierzchnia (pierścieniowa) oddziaływania fali uderzeniowej dźwiękowej

Przykładowo, dla dziobu samolotu, sumaryczna siła oporu „ P_C ” w czasie przekraczania „bariery dźwięku” wynosi:

$$P_C = P_{OP} + P_{FUD}$$

gdzie:

P_{OP} – siła oporu powietrza (N);

P_{FUD} – siła oporu fali uderzeniowej dźwiękowej (N);

$$P_{OP} = C_X \cdot \rho_P \cdot S_{OP} \cdot V_S^2 / 2 \quad (\text{N})$$

$$P_{FUD} = C_X \cdot \rho_{FUD} \cdot S_{FUD} \cdot V_Z^2 / 2 \quad (\text{N})$$

$$V_Z = V_S - V_{FU} \quad (\text{m/s})$$

gdzie:

C_X – współczynnik oporu powietrza (wielkość bezwymiarowa);

ρ_P – gęstość powietrza (kg/m^3);

ρ_{FUD} – gęstość fali uderzeniowej dźwiękowej (kg/m^3);

S_{OP} – powierzchnia rzutu dziobu na płaszczyznę prostopadłą do strugi powietrza (m^2)

S_{FUD} – powierzchnia rzutu dziobu na płaszczyznę prostopadłą do oddziaływania fali uderzeniowej dźwiękowej (m^2);

V_Z – prędkość względna samolotu (m/s);

V_S – prędkość samolotu (m/s);

V_{FU} – prędkość dźwięku (m/s).

Przekraczanie fali uderzeniowej dźwiękowej przez samolot, tzw. przekraczanie „bariery dźwięku”, powoduje wzrost oporu aerodynamicznego w wyniku oddziaływania na kadłub i skrzydła fali uderzeniowej dźwiękowej, spadek siły nośnej, zaburzenie strumienia powietrza opływającego samolot, powstanie gwałtownych drgań (różna sztywność i kształt poszycia konstrukcji kadłuba) oraz pogorszenie stabilności i sterowności samolotu [12].

5.2 Przelot samolotu z prędkością naddźwiękową przez obszar powietrza o zwiększonej gęstości.

W czasie przelotu samolotu z prędkością naddźwiękową przez obszar powietrza o zwiększonej gęstości np. chmurę deszczową, na jego kadłub oddziałuje obciążenie (narażenie) o charakterze impulsowym (rys. 14) zbliżonym do fali uderzeniowej. Przykładowo, dla dziobu samolotu, maksymalna siła obciążenia impulsowego wynosi:

$$P_{Ch} = C_X \cdot (\rho_{Ch} - \rho_P) \cdot S_{OP} \cdot V_S^2 / 2, (N)$$

gdzie:

C_X – współczynnik oporu powietrza (wielkość bezwymiarowa);

ρ_{Ch} – gęstość chmury deszczowej (kg/m^3);

ρ_P – gęstość powietrza (kg/m^3);

S_{OP} – powierzchnia rzutu dziobu na płaszczyznę prostopadłą do strugi chmury deszczowej (m^2);

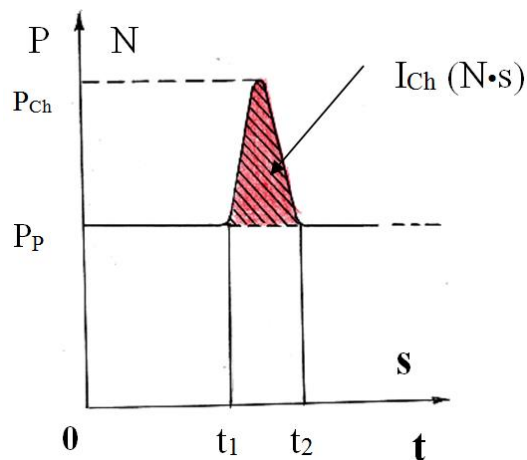
V_S – prędkość lotu samolotu (m/s);

Z kolei impuls obciążenia dziobu samolotu wynosi:

$$I_{Ch} \approx 1/2 \cdot P_{Ch} \cdot \Delta t, (N \cdot s)$$

gdzie:

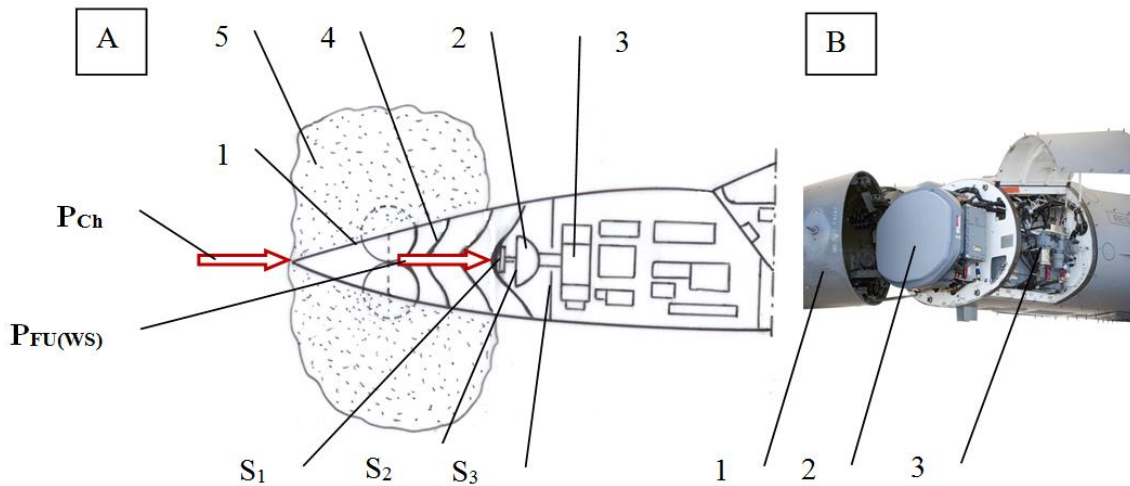
$\Delta t = t_2 - t_1$ (s), czas działania obciążenia impulsowego.



Rys. 14. Impulsu obciążenia (I_{Ch}) dziobu samolotu przelatującego przez chmurę deszczową z prędkością naddźwiękową (P_P – siła oporu powietrza)

W czasie przelotu samolotu z prędkością naddźwiękową przez chmurę deszczową (rys. 15), w materiale konstrukcyjnym dziobu samolotu, skrzydłach i innych elementach o opływowych kształtach, rozchodzi się fala (impuls) naprężeń ściskających. Naprężenia te wywołują wewnątrz kadłuba falę uderzeniową przeniesioną o charakterze kumulacyjnym, która oddziałuje niszcząco na radar pokładowy, elektroniczny blok sterujący i inne urządzenia wewnątrz samolotu. W związku z powyższym, w przypadku przelotu samolotu z prędkością naddźwiękową przez obszar

powietrza o zwiększonej gęstości (np. chmurę deszczową), opór np. dziobu samolotu (rys. 15) jest sumą oddziaływania na zewnętrzną powierzchnię dziobu S_{OP} impulsu siły oporu powietrza o zwiększonej gęstości (chmury), oraz oddziaływania na powierzchnie urządzeń wewnątrz kadłuba (S_1, S_2, S_3, \dots) siły od fali uderzeniowej przeniesionej o charakterze kumulacyjnym.



Rys. 15. Opory dziobu samolotu (A) w czasie przelotu z prędkością naddźwiękową przez chmurę deszczową (źródło własne) oraz widok (B) dziobu samolotu Mig 29 z radarem pokładowym i blokiem sterującym [13]

1 – dziób samolotu, 2 – radar pokładowy, 3 – elektroniczny blok sterujący, 4 – fala uderzeniowa kumulacyjna, 5 – chmura deszczowa, $S_1 \div S_3$ – powierzchnie oddziaływania fali uderzeniowej kumulacyjnej, P_{Ch} – siła oporu zewnętrznej powierzchni dziobu, $P_{FU(WS)}$ – siła naporu fali uderzeniowej kumulacyjnej wewnątrz dziobu

W związku z powyższym sumaryczny opór dziobu samolotu „ P_C ” czasie przelotu przez obszar powietrza o zwiększonej gęstości (rys. 13) można zapisać wzorem:

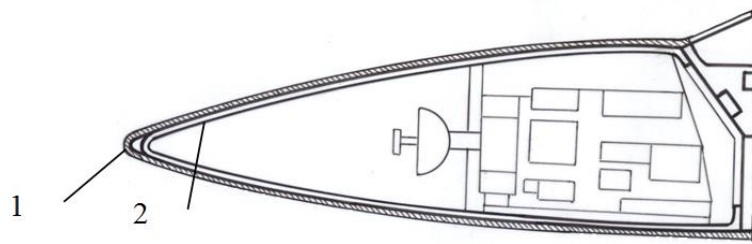
$$P_C \approx P_{Ch} + P_{FU(WS)}$$

gdzie:

P_{Ch} – opór od siły działającej na zewnętrzną powierzchnię dziobu;

$P_{FU(WS)}$ – opór od sił oddziaływania fali uderzeniowej przeniesionej, na powierzchnie urządzeń zamontowanych wewnątrz dziobu samolotu.

W oparciu o powyższe rozważania należy stwierdzić, że lot samolotu z prędkością naddźwiękową w złych warunkach atmosferycznych (występowanie chmur deszczowych, opady deszczu, gradu itp.) powoduje drgania kadłuba, pogorszenie sterowności oraz możliwość wystąpienia sytuacji awaryjnych np. awarii przyrządów pokładowych. Na rysunku 16 przedstawiono koncepcję dziobu samolotu z zamontowanym wewnątrz pojemnikiem próżniowym, który znacznie ogranicza przeniesienie do wnętrza dziobu fali uderzeniowej o charakterze kumulacyjnym.



Rys. 16. Koncepcja dziobu samolotu z zamontowanym wewnątrz pojemnikiem próżniowym
1 – obudowa dziobu, 2 – pojemnik próżniowy

6. Osłabianie energii fali uderzeniowej przez pojemnik próżniowy

Poniższe rozważania mają na celu oszacowanie stopnia osłabienia energii fali uderzeniowej po przejściu przez pojemnik próżniowy, w stosunku do jej przejścia w powietrzu, przy założeniu, że w pojemniku próżniowym wytworzono próżnię wysoką HV.

Z zasady zachowania pędu fali uderzeniowej i popędu siły oddziaływującej przez nią na wewnętrzną powierzchnię pojemnika próżniowego, wynika następująca równość:

$$m \cdot V = F \cdot t \text{ (kg} \cdot \text{m/s)}$$

gdzie:

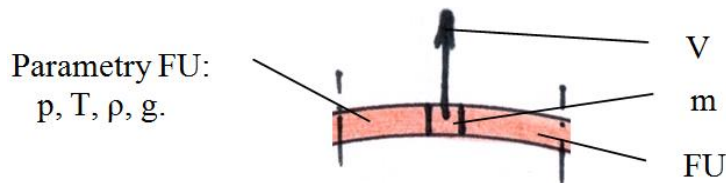
m – masa jednostkowa fali uderzeniowej (kg);

V – prędkość fali uderzeniowej (m/s);

F – siła jednostkowa fali uderzeniowej (N);

t – czas oddziaływania siły na górną powierzchnię pojemnika (s).

Interpretację pędu jednostkowego fali uderzeniowej przedstawiono na rysunku 17.



Rys. 17. Interpretacja pędu jednostkowego fali uderzeniowej
FU – fala uderzeniowa; V – prędkość fali uderzeniowej; m – masa jednostkowa fali uderzeniowej; p – ciśnienie fali uderzeniowej; T – temperatura fali uderzeniowej; rho – gęstość fali uderzeniowej

Na rysunku 18 przedstawiono przybliżony wykres zależności masy jednostkowej względnej „m” fali uderzeniowej i jej prędkości względnej „V”, w funkcji liczby cząsteczek w cm³ powietrza tj.:

$$m = m_p/m_A; \quad V = V_p/V_A$$

gdzie:

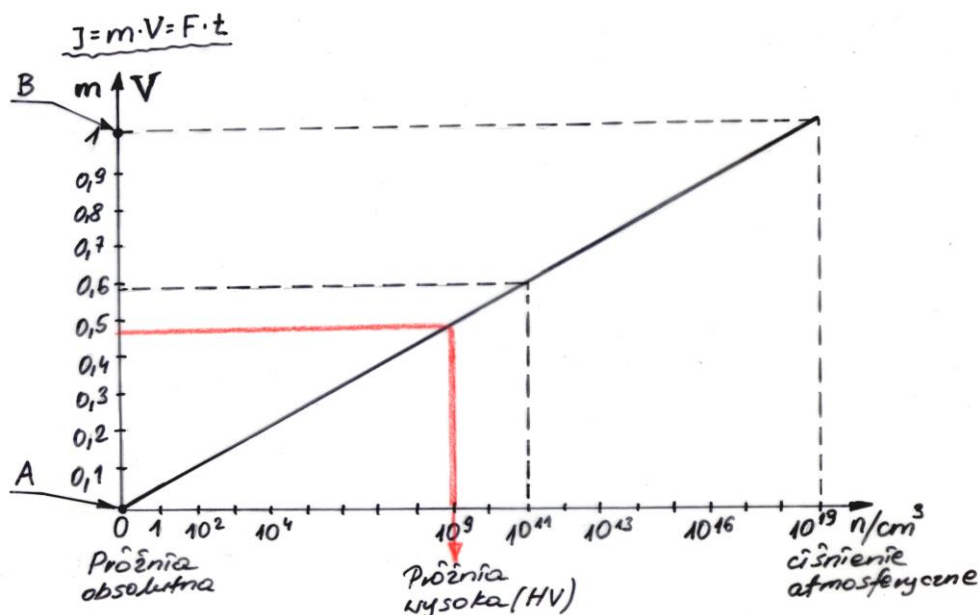
m_P – masa jednostkowa fali uderzeniowej w próżni wysokiej (HV);

m_A – masa jednostkowa fali uderzeniowej w powietrzu;

V_P – prędkość fali uderzeniowej w próżni wysokiej (HV);

V_A – prędkość fali uderzeniowej w powietrzu.

Przebieg w/w zależności na wykresie wynika z stąd, że w punkcie A wykresu (próżnia absolutna), zarówno masa jednostkowa fali uderzeniowej, jak i jej prędkość wynoszą zero. Zatem w punkcie A wykresu, pęd jednostkowy $I = m \cdot V = 0$. Z kolei w punkcie B wykresu, tj. przy ciśnieniu atmosferycznym, zarówno masa jednostkowa fali uderzeniowej, jak i jej prędkość osiągają wartości maksymalne. Zatem w punkcie B pęd jednostkowy fali uderzeniowej osiąga wartość maksymalną tj. $I = m \cdot V = I_{\max}$.



Rys. 18. Przybliżony wykres zależności względnych masy jednostkowej „m” fali uderzeniowej i jej prędkości „V”, w funkcji liczby cząsteczek w cm^3 powietrza

Z powyższego wykresu, w sposób przybliżony wynika, że po przejściu fali uderzeniowej przez próżnię wysoką (HV), gdzie znajduje się $n = 10^9$ cząsteczek powietrza w cm^3 , zarówno masa jednostkowa „m”, jak i prędkość „V” fali uderzeniowej mogą osiągać około 50% wartości jakie posiadały by w powietrzu przy ciśnieniu atmosferycznym. Zatem pęd jednostkowy fali uderzeniowej w próżni wysokiej (HV) wynosić będzie w przybliżeniu:

$$I_{(HV)} \approx 0,5 m \cdot 0,5 V \approx 0,25 m \cdot V \approx 0,25 I_{(pow.)}, \text{ tj:}$$

$$I_{(HV)} \approx 0,25 I_{(pow.)}$$

Z powyższego wynika, że pojemnik próżniowy, w którym wytworzona zostanie próżnia wysoka (HV), osłabi około czterokrotnie oddziałyującą na niego falę uderzeniową.

W praktyce uzyskanie próżni na poziomie $10^{-3} \div 10^{-7}$ mbar, tzw. próżni wysokiej (HV), jest stosunkowo łatwe [14].

Nowej generacji transportery opancerzone stosowane w świecie odporne są na wybuch pod kadłubem ładunku materiału wybuchowego o masie 10 kg. W przypadku zamontowania w pojazdach tych pojemnika próżniowego oraz dokonania innych zmian konstrukcyjnych, ich odporność na wybuchy mogła by zwiększyć się do 40 kg MW.

W tabelicy 1 zestawiono liczbę zdarzeń w czasie konfliktu w Afganistanie z użyciem urządzeń IED, w funkcji ilości materiału wybuchowego HME użytego w urządzeniach IED [15].

Tablica 1. Wielkość wagomiaru HME w ładunku głównym IED.

| Ilość MW | Do 15 kg | 16-40 kg | 41-60 kg | 61-100 kg | Powyżej 100 kg | Brak informacji | Suma |
|----------------|----------|----------|----------|-----------|----------------|-----------------|------|
| Liczba zdarzeń | 9 | 32 | 17 | 16 | 3 | 43 | 121 |

Mając na uwadze porównywalną energię wybuchu HME z TNT należy stwierdzić, że w konstrukcji IED przeciwnik używa najczęściej materiału wybuchowego o wagomiarze w przedziale 16÷40 kg TNT.

Z powyższego wynika, że odporność pojazdu na detonację urządzeń IED o masie 40 kg MW, zapewniła by bezpieczeństwo załogi w około 53% zdarzeń z użyciem w/w urządzeń wybuchowych.

7. Wnioski

- 1) Oddziaływanie obciążeń udarowych na przegrody stałe i ruchome o różnym kształcie i grubości, generuje strumień kumulacyjny, pocisk, odłamki i falę uderzeniową przeniesioną.
- 2) Oddziaływanie wybuchu na środki transportowe stwarza zagrożenie życia załogi, w wyniku uszkodzenia kadłuba, pulsacji ciśnienia fali uderzeniowej przeniesionej, odłamków oraz wibracji i przeciążeń.
- 3) Analiza rozwiązań konstrukcyjnych różnego typu osłon, paneli i urządzeń przeciwwybuchowych przeciwdziałających działaniu fali uderzeniowej wskazuje na to, że jednym z rozwiązań możliwych do zastosowania w pojazdach np. patrolowych, jest zamontowanie w jego kadłubie pojemnika próżniowego.
- 4) W procesie opracowania nowej generacji środków transportowych odpornych na miny, urządzeń (osłon i paneli) przeciwwybuchowych, napędów detonacyjnych i środków minersko-zaporowych, przydatna jest znajomość praw i analogii zjawisk fizycznych występujących w czasie wybuchu.

Literatura

- [1] Praca zbiorowa pod redakcją JACHA K., Komputerowe modelowanie dynamicznych oddziaływań ciał metodą punktów swobodnych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [2] ŚLIWIŃSKI J., LUDAS M., Wojciechowski A., Problem ochrony przeciwminowej załogi wozu bojowego. Konferencja Naukowo-Techniczna pt.: Bezpieczeństwo

- wojsk w aspekcie zagrożeń wynikających z użycia improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED). Wyd. Akademia Obrony Narodowej, str. 236÷250. Warszawa 2014.
- [3] MILLER D., FOSS Ch., Ilustrowana encyklopedia pt.: Współczesna wojna lądowa”. Wyd. ESPANDON, Warszawa 1994.
- [4] SASKA P. Ocena stopnia pochłaniania energii fali uderzeniowej wybuchu przez osłony o różnym kształcie obciążone małymi ładunkami wybuchowymi. Konferencja Naukowo-Techniczna pt.: Bezpieczeństwo wojsk w aspekcie zagrożeń wynikających z użycia improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED). Wyd. Akademia Obrony Narodowej, str. 182÷204. Warszawa 2014.
- [5] ŚLIWIŃSKI J., LUDAS M., Ocena odporności przeciwminowej konstrukcji kadłubów pojazdów mino odpornych i kołowych transporterów opancerzonych, Czasopismo Logistyka Nr 5/2015, str. 1551÷1557, Poznań 2015.
- [6] ŚLIWIŃSKI J., ŚLIWIŃSKI C., LUDAS M., Effect of Explosion Effect on Bottom of the Hull of Mine-Resistant Ambush Protected (MRAP) Vehicles. The book of papers of the 2016 Biograd Symposium, 211-218.
- [7] ŚLIWIŃSKI J., LUBACH I., ŚLIWIŃSKI C., MALEJ W. Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu na wynalazek pt.: Panel przeciwybuchowy linowy, Nr zgłoszenia P.420416, WITI 2016 r.
- [8] ŚLIWIŃSKI J., PLEBANKIEWICZ I., MALEJ W., ŚLIWIŃSKI C., Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu na wynalazek pt.: Zestaw przeciwybuchowy, Nr zgłoszenia P.418093, WITI 2016 r.
- [9] ŚLIWIŃSKI J., PLEBANKIEWICZ I., MALEJ W., ŚLIWIŃSKI C., Zgłoszenie w sprawie uzyskania patentu na wynalazek pt.: Zestaw przeciwybuchowy, Nr zgłoszenia P.418094, WITI 2016 r.
- [10] https://eshelon.files.wordpress.com/2012/08/lvac_02-what_if.jpg.
- [11] <http://adonai.pl/nauka/id=7>.
- [12] <http://www.mt.com.pl/bariera-dzwieku>.
- [13] foxtrotalpha.jalopnik.com/how-to-win-in-a-dogflight-stories-from-a-pilot-who-flew-1682723379.
- [14] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Próżnia>.
- [15] PIELA G., Wpływ taktyki i techniki użycia improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED), Praca zbiorowa pod redakcją: KOWALKOWSKIEGO S., BĘBENKA B., CAŁKOWSKIEGO T., pt.: Bezpieczeństwo wojsk w aspekcie zagrożeń wynikających z użycia improwizowanych urządzeń wybuchowych (IED), Wyd. Dowództwo Wojsk Lądowych, Warszawa 2014 r.
- [16] WŁODARCZYK E., Wstęp do mechaniki wybuchu, Wyd. PWN Warszawa 1994 r.
- [17] MARANDA A., CUDZIŁO S., NOWACZEWSKI J., PAPLIŃSKI A., Podstawy chemii materiałów wybuchowych. Wyd. Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1997 r.
- [18] SMOLEŃSKI D., Detonacja materiałów wybuchowych. Wyd. Ministerstwo Obrony Narodowej. Łódź 1981 r. ISBN: 8311066736.

IMPACT OF SHOCK LOADS ON PARTITIONS AND VEHICLES

Summary

The paper presents short characteristics of the explosion phenomenon and the usefulness of blast wave energy and shock wave in the design of products aimed at the military. Furthermore, the impacts of shock loads on immovable and movable partitions of varying shapes and thickness which may generate jet stream of metal, a bullet, fragments and blast wave have been illustrated. The issue of the impact of shock wave on vehicles, vessels and aircrafts has been studied. A concept of a new approach to crew protection in all the means of transport has been introduced in the form of a vacuum containers mounted in their bodies. It has also been found that the awareness and in-depth knowledge of the laws and analogous physical phenomena may be useful at the stage of designing new mine and IED-resistant vehicles, of new explosion-proof shields and panels, as well as mining and breaching equipment.