

**dr hab. inż. Wiesław Barnat, prof. WAT**

Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej  
Wojskowa Akademia Techniczna  
ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa  
email: wieslaw.barnat@wat.edu.pl

## **Numeryczne badanie wpływu zastosowania zagłówka na ciało żołnierza znajdującego się w pojeździe obciążonym ładunkiem bocznym 25 kg**

**Słowa kluczowe:** pojazd specjalny, wybuch boczny, analiza MES

**Streszczenie:** Problematyka odporności udarowej załóg pojazdów specjalnych jest opisywana w wielu artykułach i dokumentach standaryzacyjnych. Publikacje te głównie dotyczą małych wielkości ładunków wybuchowych oddziałujących na pojazd. W przypadku dużych ładunków, o wielkości od 25 do 1000 kg, literatura tematu jest bardzo uboga. Istniejące pozycje literaturowe odnoszą się do oddziaływania ładunku umieszczonego pod kołem lub kadłubem pojazdu. W pracy przedstawiono wpływ wielkości ładunku 25 kg umieszczonego z boku pojazdu na organizm żołnierza znajdującego się w nim.

Przedsięwzięcie to zrealizowano za pomocą analizy numerycznej układu mechanicznego pojazdu-wybuch. Wybuch został zamodelowany funkcją CONWEP. Numeryczną analizę przeprowadzono przy użyciu oprogramowania LS-DYNA. Pojazd został opisany elementami Lagrange'a. W artykule przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych elementów struktury nośnej wozu bojowego obciążonej udarem wygenerowanym przez eksplozję dużego ładunku wybuchowego umieszczonego z boku w odległości 5 m od burty pojazdu na wysokości 1 m. Zastosowana metoda nie pozwala na uwzględnienie zjawisk Macha zachodzących podczas odbicia fali od podłoża.

### **1. Wstęp**

Pojazdy specjalne są narażone na działanie wielu środków ogniowych, którymi dysponuje przeciwnik, przede wszystkim improwizowanych ładunków wybuchowych (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 ich załóg. Działania te związane są między innymi z zapewnieniem odpowiedniego poziomu ochrony przed środkami minowymi różnych klas (różnorodne materiały wybuchowe, różne masy, różnorodne umiejscowienie ładunków).

Zasadniczy problem pojawia się przy tworzeniu skutecznej ochrony załogi i wyposażenia wewnętrznego przed środkami minowymi [1, 3, 4, ], a w szczególności przed improwizowanymi urządzeniami wybuchowymi, które mogą mieć dużą masę ładunków wybuchowych.

Dotychczas było prowadzonych wiele prac nad przeżywalnością ludzi. Głównym motorem postępu w tej dziedzinie było lotnictwo. Działania wojenne powodują, iż przeciwnik w konfliktach nieregularnych wykorzystuje materiały wybuchowe, które ze względu na sposób klasyfikacji nazywane są improwizowanymi materiałami wybuchowymi. Ładunki te oddziałują na pojazd w zależności od wielkości w sposób lokalny lub globalny.

W przypadku oddziaływania wybuchu na pojazd istnieje możliwość klasyfikacji skutków na:

- przewrócenie pojazdu [5]
- podrzucenie pojazdu (oddziaływanie na załogę pojazdu podczas poderwania i opadania) [3, 4],
- penetrację pancerza,

- powstanie fali membranowej [2, 3].

Głównym czynnikiem oddziaływania wybuchu na załogę jest przyspieszenie. Wybuch (impuls ciśnienia) oddziałujący na bok pojazdu poprzez elementy konstrukcyjne takie jak podstawa siedzenia, kadłub (podłoga) wywołuje przyspieszenia pionowe i wzdłużne kątowe oraz poprzeczne kątowe na żołnierza znajdującego się w pojeździe. Najbardziej narażone na uszkodzenia są elementy układu kostnego takie jak piszczele, kręgosłup (odcinki w okolicach miednicy i szyjny). Prace nad biomechaniczną odpornością ciała ludzkiego są prowadzone w wielu aspektach poczynając od wypadków samochodowych, lotniczych jak i eksplozji materiałów wybuchowych [6, 7, 10, 12- 17]. Praktycznie, prace te są prowadzone na całym świecie.

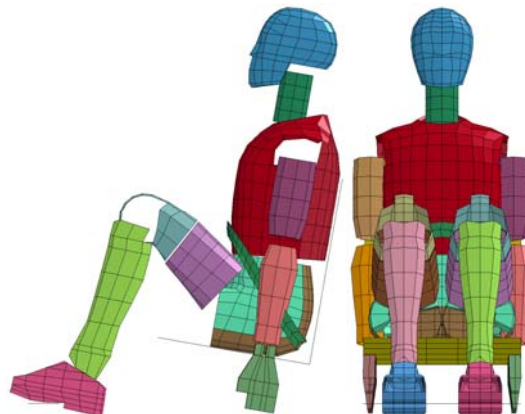
W przypadku braku zastosowania pasów (lub ich nie zapięcia) istnieje duże prawdopodobieństwo uderzenia głową w dtop pojazdu. Takie uderzenie może poskutkować uszkodzeniem partii szyjnej kręgosłupa [11].

Odpowiedź organizmu ludzkiego na duże przyspieszenia zbadali między innymi Patrick, Kroell i Mertz [9] stwierdzając, iż najbardziej narażonym organem ludzkiego ciała na przeciążenia jest mózg. Autorzy wykazali zależność pomiędzy wielkością impulsu a jego czasem oddziaływania.

W mniejszej pracy skupiono się nad skutkami oddziaływania ładunków bocznych na pojazd, a w zasadzie na ciało ludzkie. W pracy przedstawiono skutki oddziaływania ładunków wybuchowych na załogi pojazdów specjalnych. Dodatkowo, zbadano wpływ zastosowanego zagłówka na odpowiedź ciała ludzkiego.

## 2. Opis modeli numerycznych

Podczas badania zachowania się żołnierzy w pojeździe opancerzonym wykorzystuje się najczęściej oprogramowanie do opisu zjawisk szybkozmiennych LS-Dyna lub MSC Dytran. Programy te zawierają jawną implementację Metody Elementów Skończonych. Pozwalają one na modelowanie złożonych zjawisk z zakresu klasycznej mechaniki, mechaniki przepływów, dynamicznych zjawisk, jak i oddziaływania silnych nieciągłości na różnego rodzaju struktury. W obliczeniach wykorzystano model manekina Hybrid Dummy III 95% Male [8] przedstawiony na rys. 1. Model ten został opracowany i przebadany przede wszystkim dla przemysłu motoryzacyjnego. Jest on wykorzystywany w badaniach nad zwiększeniem bezpieczeństwa kierowców, pasażerów, a także uczestników wypadków drogowych.



Rys. 1. Model manekina Hybrid III

Manekiny Hybrid III, jak już wspomniano, są wykorzystywane do symulacji ciała ludzkiego. Dzięki budowie zbliżonej do budowy człowieka analiza uzyskanych wyników daje pełny obraz prawdopodobieństwa doznanych urazów.

W opracowaniu Grzegorzewskiego [6] wykazano, iż przyśpieszenie ok. 100 g/2ms jest śmiertelne. Dokładniejsze badania przedstawił w 1996 roku Allem i wartość tą zwiększył do 150 g/2ms. Zestawienie przypadków uszkodzenia części ciała w zależności od czasu działania przedstawiono w tabeli 1.

**Tab. 1.** Wskaźniki przeżywalności wg AEP-55 [1]

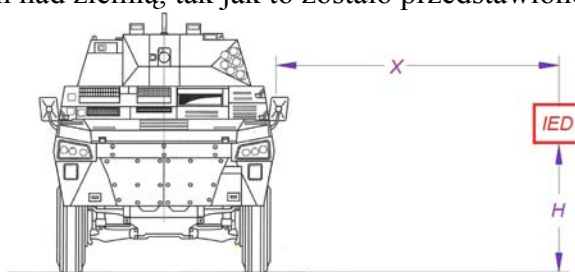
Lp.	Część ciała	Kryterium	Wartość dopuszczalna	istotność (znaczenie)
1.	podudzie	maksymalna wartość siły ściskającej piszczele (-Fz)	5,4 kN	10% ryzyka dla ASI 2+
2.	piersiowo-lędźwiowego kręgosłupa	DRI – dynamiczny wskaźnik odpowiedzi wyznaczony na podstawie przyspieszenia miednicy Az	17,7	10% ryzyka dla ASI 2+
3.	kręgosłup szyjny (szyja)	siła ściskająca górny odcinek szyi (-Fz)	4 kN (przez 0 ms) 1,1 kN (przez 30 ms)	Poważne (ASI 3) urazy są mało prawdopodobne
		moment zginający górny odcinek szyi zginanie (+My) rozciąganie (-My)	190 Nm 77 Nm	Średnie (ASI 2) urazy są mało prawdopodobne
4.	Narządy wewnętrzne	CWVP – wskaźnik ugięcia klatki piersiowej	3,6 m/s	

Praktycznie wskaźniki przeżywalności opisane w AEP-55 są określonymi wielkościami wyznaczonymi na podstawie badań nad przeżywalnością ludzi.

Dodatkowe prace prowadzone w NATO [11] dotyczyły urazowości piszczeli w wyniku oddziaływania impulsu siły osiowej na piszczele w aspekcie wieku żołnierzy poddanych impulsom obciążenia. Prace te wykazały, iż w wyniku oddziaływania siły osiowej ok. 9 kN urazowość ludzi w wieku 65 lat jest 100%, 45 latków 90%, a w przypadku 25 latków maleje do 25%.

W niniejszej pracy zamieszczono wyniki wstępnych analiz numerycznych oddziaływania wybuchu dużego bocznego ładunku IED na członka załogi pojazdu specjalnego. W przeprowadzonych analizach za obiekt badań przyjęto pojazd kołowy o masie około 22t.

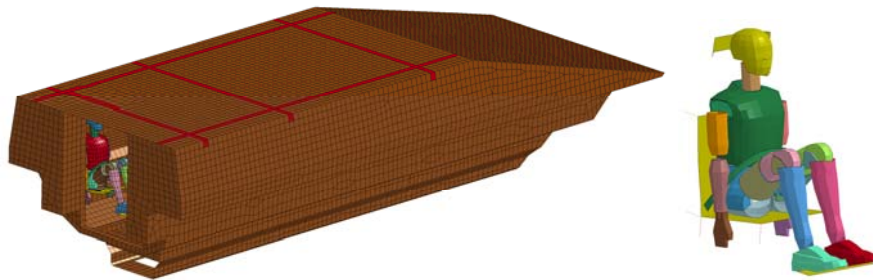
Ładunek IED umiejscowiony był w odległości X równiej 5 m od pojazdu i na wysokości H równiej 1 m nad ziemią, tak jak to zostało przedstawione na rys. 2.



**Rys. 2.** Schemat umieszczenia ładunku względem kadłuba pojazdu.

Elementy Lagrange'a typu Shell Quad 4 wykorzystano do modelowania zachowania się płyt stalowych pojazdu. Elementom tym nadano następujące własności mechaniczne:  $E = 2,1 \cdot 10^9$  MPa,  $\nu = 0,31$ . Do opisu zachowania się stali wykorzystano biliniowy model

materiału elastoplastycznego. Jako kryterium zniszczenia przyjęto maksymalne odkształcenie [10]. Ogólny widok modelu numerycznego pojazdu, jak i przekrój całego układu, został przedstawiony na rys. 3. Fotel z manekinem Hybrid III oraz sposób mocowania przedstawiono na rysunkach poniżej.



**Rys. 3.** Model numeryczny pojazdu z członkiem załogi.

Analizom numerycznym poddano dwa modele różniące się zastosowanym zagłówkiem (model 1 bez zagłówka, model 2 z zagłówkiem). Do analiz numerycznych oddziaływania impulsu na członka załogi wykorzystano model manekina Model Hybrid III. Model manekina – 50 centylowy Hybrid III zaimplementowany do modelu pojazdu przez system LS-DYNA. Manekin posadowiony na sztywnym siedzeniu z podnóżkami oraz biodrowymi pasami bezpieczeństwa.

Podczas analiz numerycznych uwzględniono oddziaływanie grawitacji na model numeryczny.

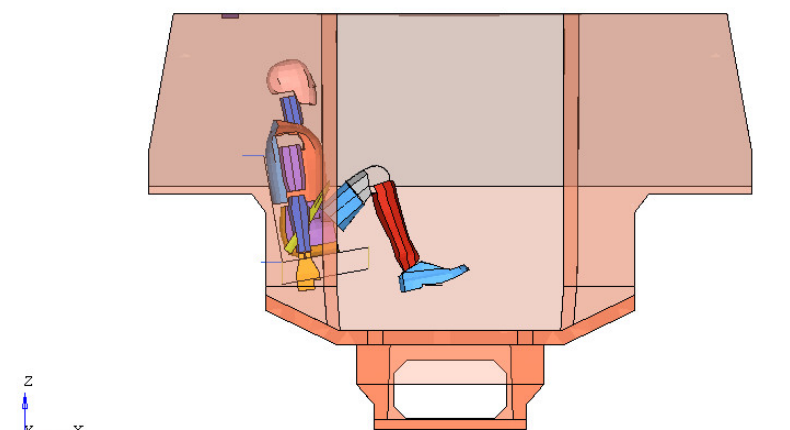
Wszystkie testy wojskowych pojazdów opancerzonych są przeprowadzane zgodnie z odpowiednią normą, w tym przypadku jest to NATO STANAG 4569. Jednym z możliwych testów odporności przeciwminowej jest badanie skutków detonacji miny przeciwpancernej TM 57 o masie ładunku trotylu - 6,34 kg. Ze względu na konieczność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

### 3. Wyniki analiz numerycznych

#### 3.1. Wyniki analiz numerycznych obciążenie 25 kg bez zagłówka

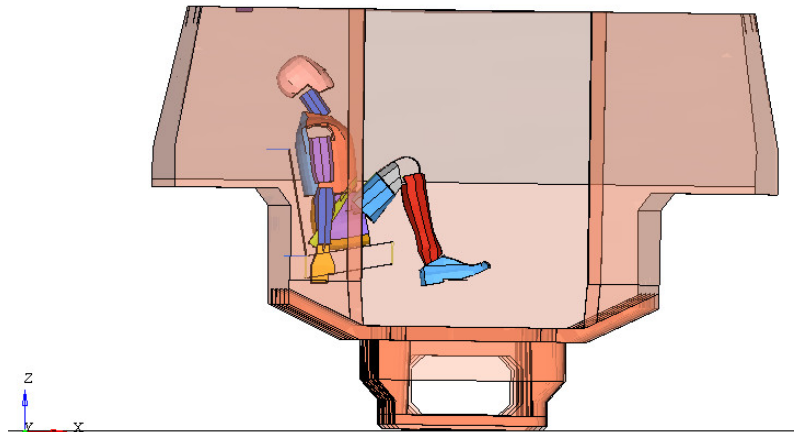
W wyniku wybuchu ładunku nastąpiło oddziaływanie fali ciśnienia na bok pojazdu. Na rys. 4 pokazano kolejne fazy przemieszczenia kadłuba pojazdu pod wpływem 25 kg ładunku TNT.

a)



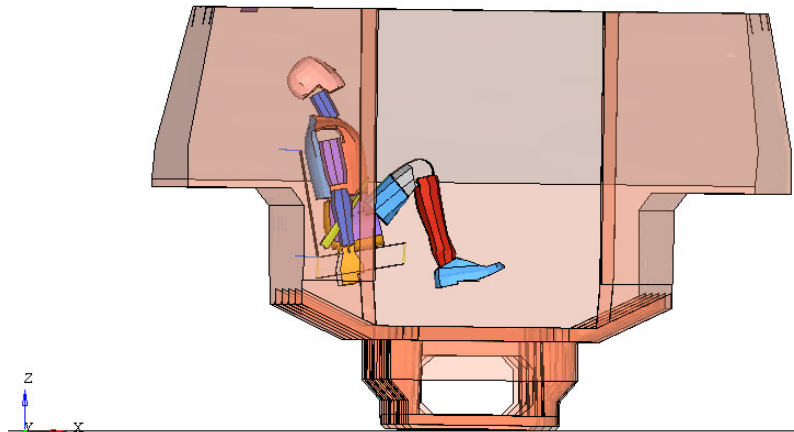
25 kg TNT  
Wybuch z boku pojazdu  
Time = 0.099999

b)



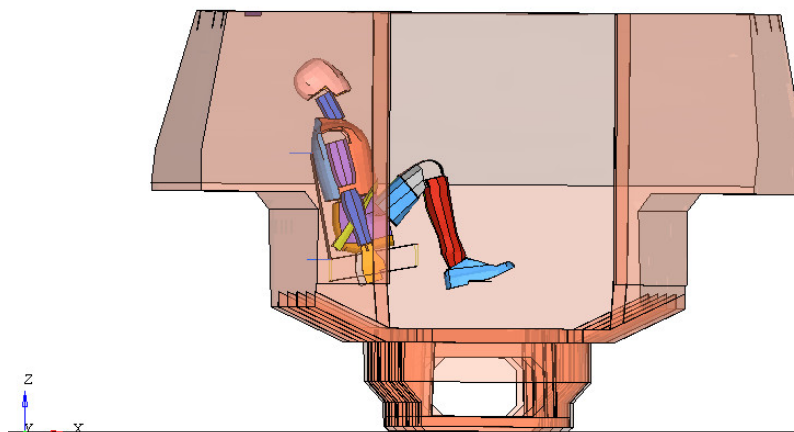
25 kg TNT  
Wybuch z boku pojazdu  
Time = 0.199998

c)



25 kg TNT  
Wybuch z boku pojazdu  
Time = 0.249998

d)



25 kg TNT  
Wybuch z boku pojazdu  
Time = 0.300484

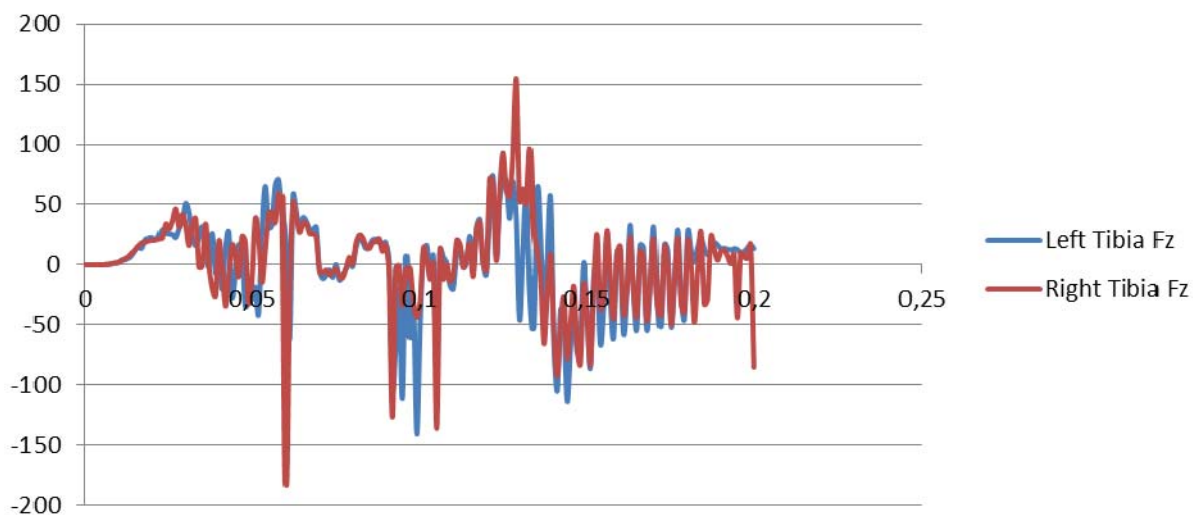
**Rys. 4.** Sposób deformacji kadłuba pojazdu oraz oddziaływania wybuchu na manekina w różnych chwilach czasowych: a) 0 ms, b) 0,2 ms, c) 0,25 ms, d) 0,3 ms.

Warto zwrócić uwagę na przemieszczenie się do tyłu głowy manekina (szczególnie wyraźnie widoczne na rys. 4b), które może uszkodzić szyję żołnierza. Przemieszczenie to jest spowodowane brakiem zagłówka. Dodatkowo, ładunek wybuchowy przesunął cały pojazd. Przesunięcie niesymetryczne zostało spowodowane niesymetrycznością kadłuba pojazdu oraz sposobem umieszczenia ładunku poza środkiem ciężkości.

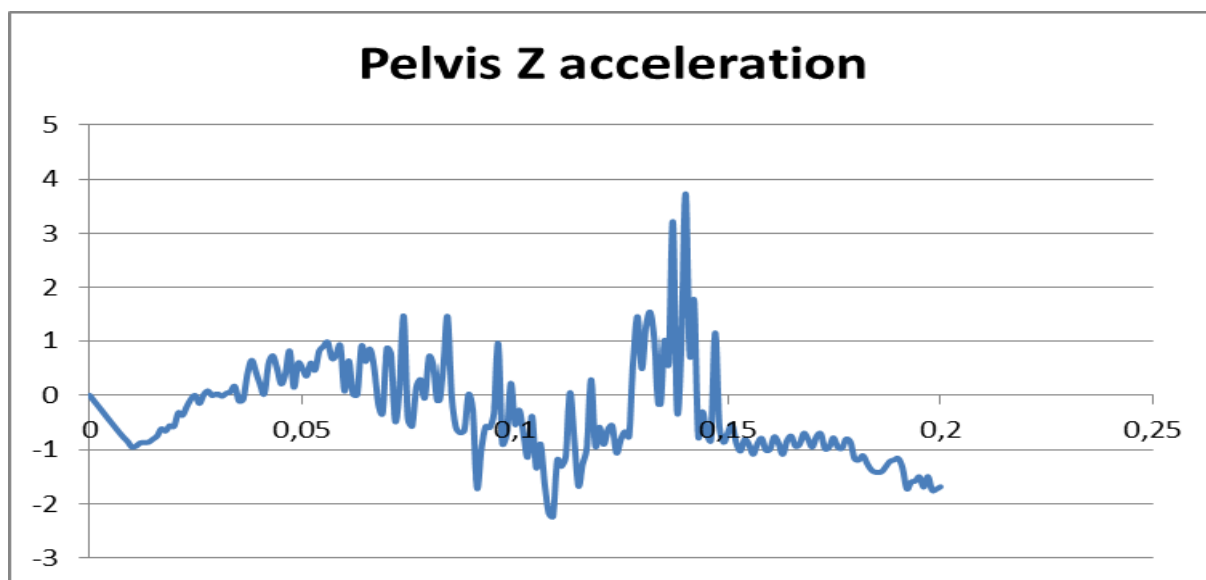
Analizując rysunki 4 a-d warto zauważyć, iż plecy manekina Hybrid III oderwały się od oparcia. Oderwanie się pleców nastąpiło pomimo zastosowania pasów bezpieczeństwa.

Główną ocenę urazowości przeprowadza się w wyniku analiz przebiegów czasowych wielkości fizycznych przedstawionych na poniższych wykresach (rys. 5-8). Wartości maksymalne mierzonych wielkości przedstawiono dodatkowo w tabeli 2.

Sposób obciążenia pojazdu wymusza inne oddziaływanie na członka załogi niż dotychczas. Przeważnie pojazdy były badane na obciążenie wybuchem ładunku umieszczonym centralnie lub pod kołem. Skutkowało to dużymi wartościami sił i przyspieszeń pionowych działających na człowieka. W omawianym przypadku wartości siły ściskającej piszczel wynosi około 141 N (rys. 5).

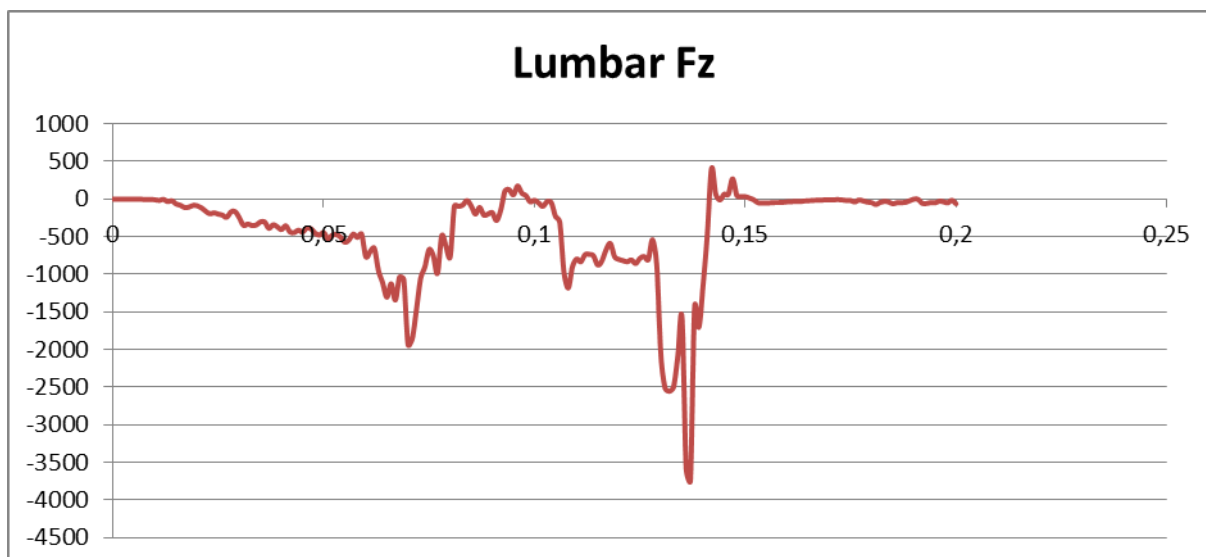


Rys. 5. Wykres siły wzdluznej w obu piszczelach os Y [N] os X [ms]



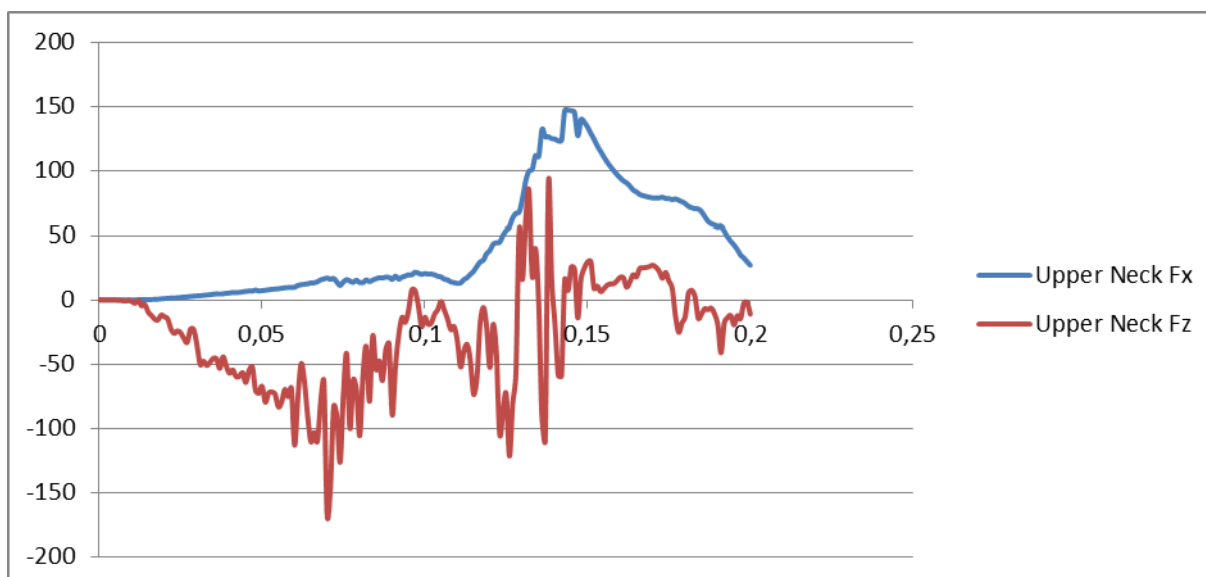
Rys. 6. Wykres przyspieszenia w kierunku pionowym miednicy os Y [ $m/s^2$ ] os X [ms]

W omawianym przypadku maksymalna wartość przyspieszenia w kierunku pionowym miednicy wyniosła 3,7 g (rys. 6).



**Rys. 7.** Wykres siły wzdłużnej w kręgosłupie oś Y [N ] oś X [ms]

Podobnie jak w przypadku przyspieszeń w kręgosłupie wartość siły wzdłużnej w kręgosłupie nie osiąga krytycznych wielkości i wynosi ona 3750 N (rys. 7).



**Rys. 8.** Wykres siły wzdłużnej i poprzecznej w szyi oś Y [N ] oś X [ms]

Interesującym jest wykres sił w szyi. Praktycznie wartości te mogą się różnić od uzyskanych ze względu na siły bezwładności związane ściśle z masą układu. W rzeczywistym pojeździe żołnierz siedzi z założonym hełmem na głowie (który wraz z dodatkowym osprzętem może ważyć kilka kilogramów).

W porównaniu z wartościami siły w kończynach dolnych maksymalna wartość siły rozciągającej Fz wyniosła 168 N, a siły poprzecznej (ścinającej) Fx 150 N.

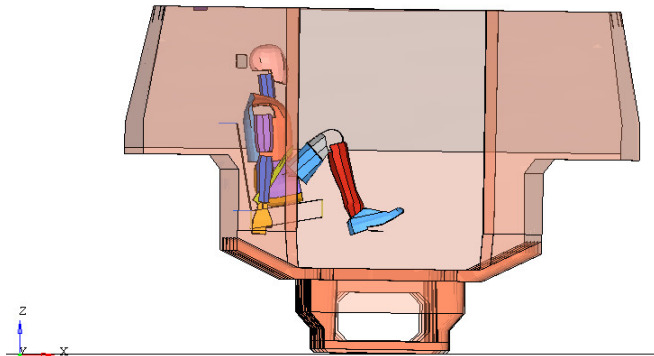
### 3.2. Wyniki analiz numerycznych obciążenie 25 kg z zagłówkiem

W omawianym modelu zastosowano dodatkowy zagłówek znajdujący się z tyłu pojazdu. Podobnie jak w modelu pierwszym W wyniku wybuchu ładunku nastąpiło oddziaływanie fali ciśnienia na bok pojazdu. Na rys. 9 pokazano kolejne fazy przemieszczenia kadłuba pojazdu (z zamontowanym zagłówkiem do siedzenia) pod wpływem



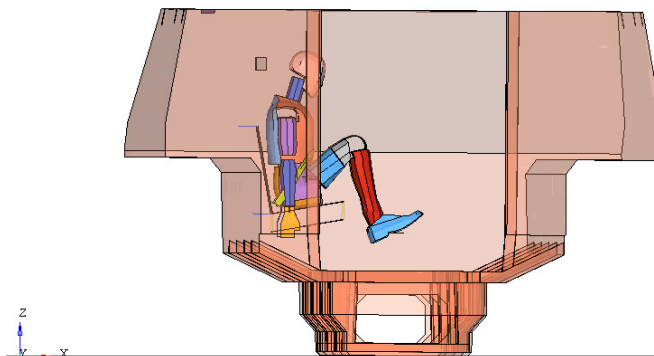
oddziaływania 25 kg ładunku TNT.

a)



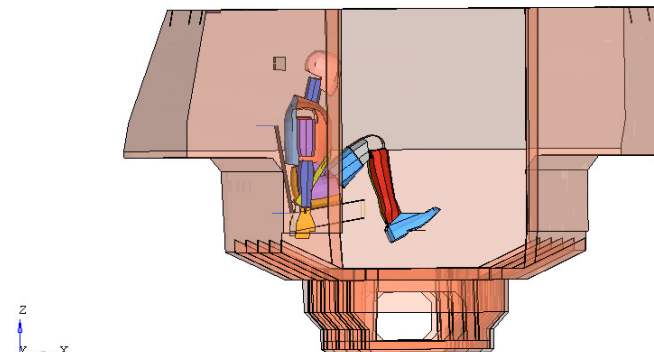
25 kg TNT  
Wybuch z boku pojazdu  
Time = 0.199998

b)



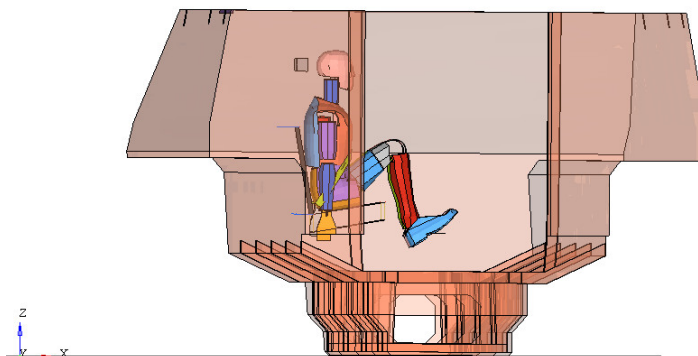
25 kg TNT  
Wybuch z boku pojazdu  
Time = 0.299999

c)



25 kg TNT  
Wybuch z boku pojazdu  
Time = 0.399998

d)



25 kg TNT  
Wybuch z boku pojazdu  
Time = 0.499997

**Rys. 9.** Sposób deformacji kadłuba pojazdu oraz oddziaływania wybuchu na manekina w różnych chwilach czasowych: a) 0.2 ms, b) 0.3ms, c) 0.4ms, d) 0.5ms.

W porównaniu z poprzednim modelem nie doszło do odchylenia głowy żołnierza do

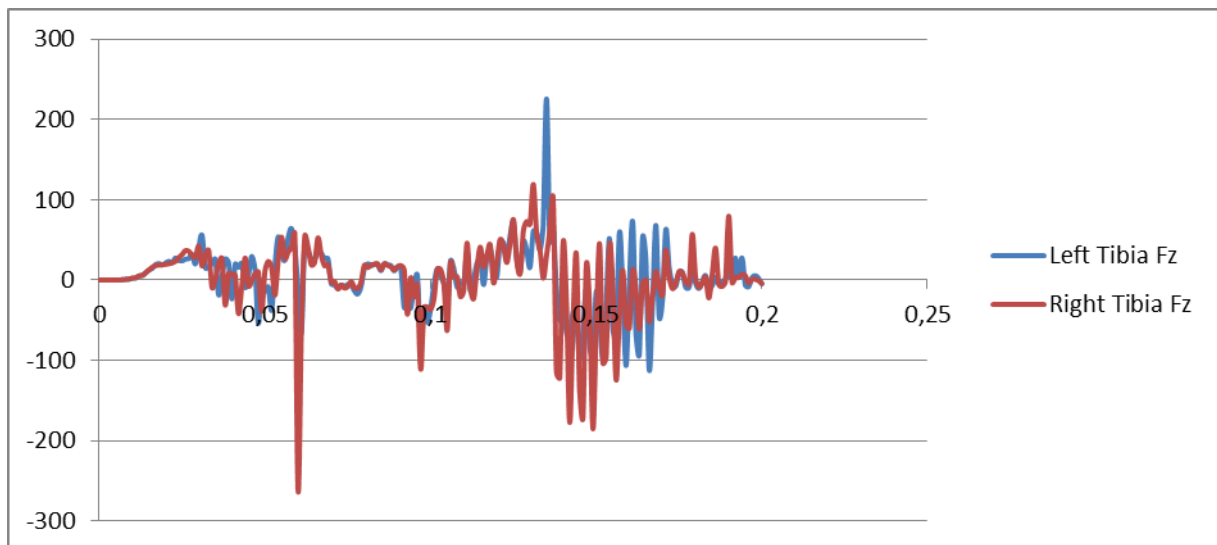


tyłu poprzez zastosowanie zagłówka (rys 4b). Podobnie jak w modelu pierwszym ładunek wybuchowy przesunął cały pojazd. Przesunięcie niesymetryczne zostało spowodowane niesymetrycznością kadłuba pojazdu oraz sposobem umieszczenia ładunku poza środkiem ciężkości.

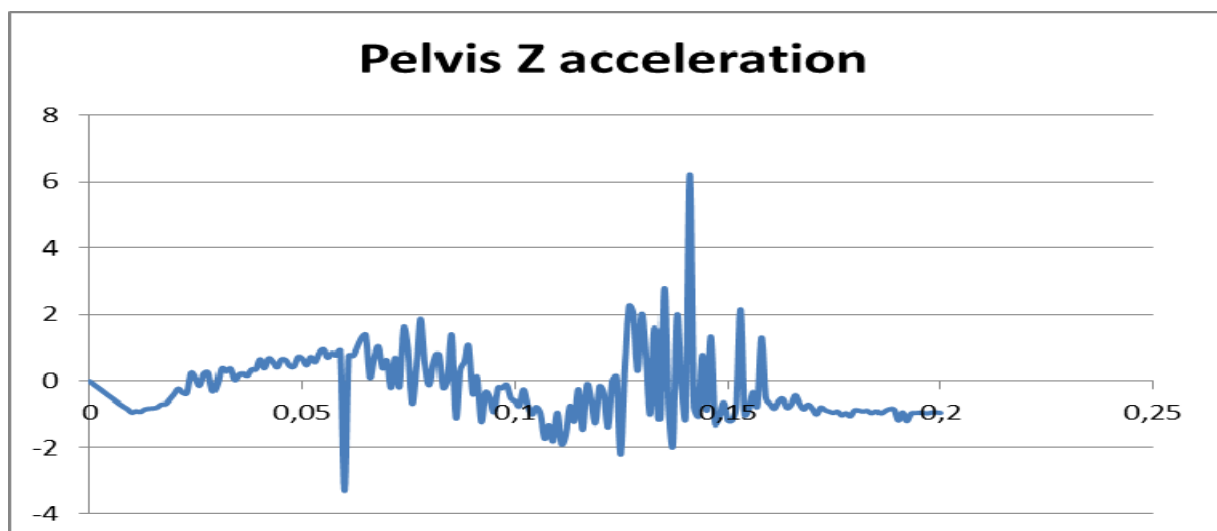
Analizując rysunki 9 warto zauważyć, iż plecy manekina Hybryd III oderwały się od oparcia podobnie jak w pierwszym przypadku. Oderwanie się pleców nastąpiło pomimo zastosowania pasów bezpieczeństwa.

Główną ocenę urazowości przeprowadza się w wyniku analiz przebiegów czasowych wielkości fizycznych przedstawionych na poniższych wykresach (rys 10-13). Porównanie wartości maksymalnych mierzonych wielkości przedstawiono dodatkowo w tabeli 2.

W omawianym przypadku wartości siły ściskającej piszczele wynosi około 262 N (rys. 10).

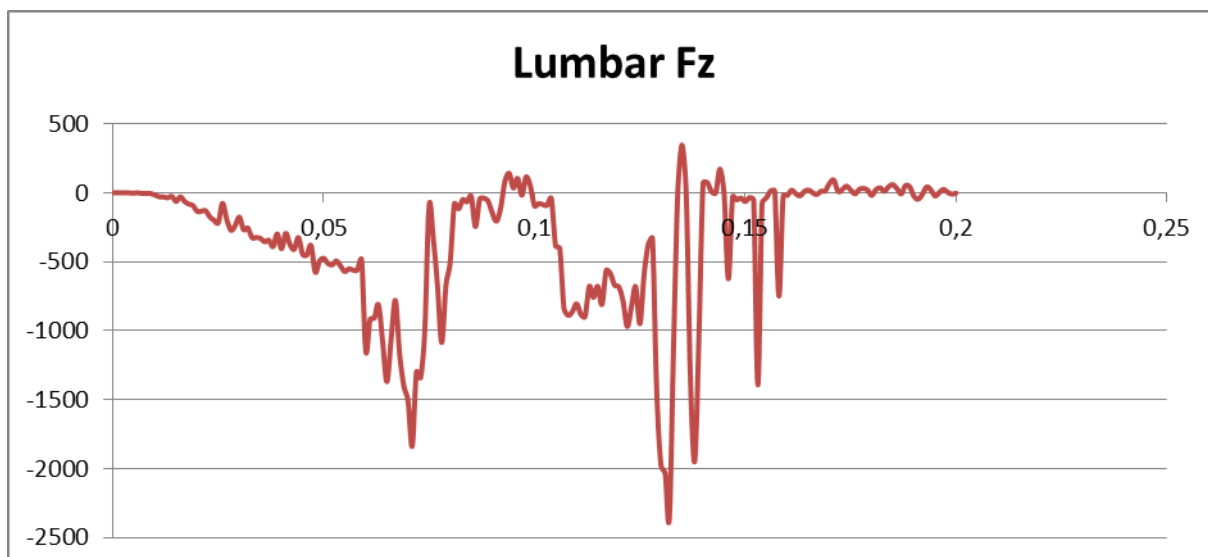


**Rys. 10.** Wykres siły wzdłużnej w obu piszczelach dla przypadku z zastosowanym zagłówkiem oś Y [N] oś X [ms]



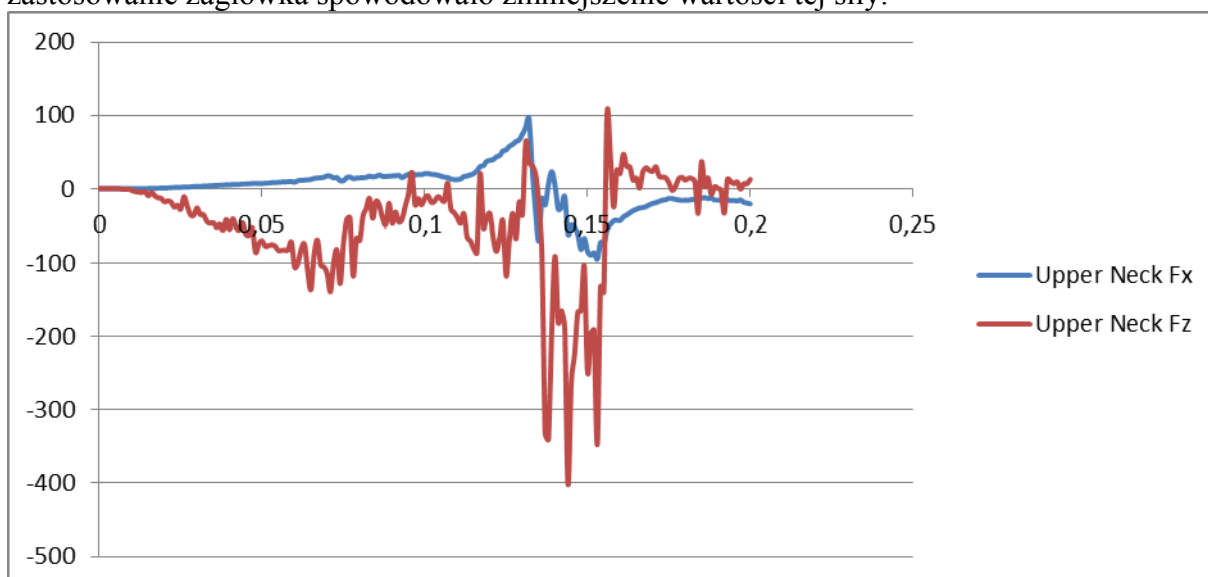
**Rys. 11.** Wykres przyspieszenia w kierunku pionowym miednicy oś Y [N] oś X [ms]

W omawianym przypadku maksymalna wartość przyspieszenia w kierunku pionowym miednicy wyniosła 6,2 g (rys. 11).



**Rys. 12.** Wykres siły wzdłużnej w kręgosłupie oś Y [N ] oś X [ms]

Podobnie jak w przypadku przyspieszeń w kręgosłupie wartość siły wzdłużnej nie osiąga krytycznych wielkości i wynosi ona 2360 N (rys. 12). Warto zauważyć, iż zastosowanie zagłówka spowodowało zmniejszenie wartości tej siły.



**Rys. 13.** Wykres siły wzdłużnej i poprzecznej w szyi oś Y [N ] oś X [ms]

Podobnie jak w poprzednim przypadku interesującym jest wykres sił w szyi. Praktycznie wartości te mogą się różnić od uzyskanych ze względu na siły bezwładności związane ściśle z masą układu. W symulacjach pominięto masę hełmu. Przy jej uwzględnieniu szacunkowe wyniki będą się przedstawiały nieco inaczej. W porównaniu z wartościami siły uzyskanymi dla modelu pierwszego odnotowano znaczny spadek wartości siły poprzecznej (ścinającej) do wartości  $F_x$  100 N. Niestety, zastosowanie zagłówka wzmocniło oddziaływanie siły rozciągającej  $F_z$  która wyniosła 400 N.

**Tab. 2** Maksymalne wartości z przebiegów przyspieszeń i sił.

	Pelviz „Z” acceleration [g]	Lumbar Fz [N]	Upper Neck Fz [N]	Upper Neck Fx [N]	Tibia R Fz [N]	Tibia L Fz [N]
25 kg ref.	3,7	-3750	-168	150	-182	-141
25 kg z zagłówkiem	6,2	-2360	-400	100	-262	-225

#### 4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono jeden z wycinków analizy ochrony żołnierzy poruszających się w pojazdach specjalnych. Dotychczasowe prace nie obejmowały oddziaływania bocznego dużych ładunków na załogi pojazdów. Zastosowanie metody elementów skończonych do analiz numerycznych pozwala na ograniczenie czasu trwania procesu konstruowania. Warto pamiętać, iż uzyskanie wiarygodnych wyników nie zwalnia konstruktorów z krytycznego podejścia do uzyskanych wyników. Dodatkowo, warto zauważyć, iż niektóre wielkości służące do oceny wartości przeżywalności ludzi nie zostały przekroczone. Powoduje to konieczność przeprowadzenia modyfikacji sposobu usadowienia żołnierzy desantu.

Odpowiednie umieszczenie ładunku względem pojazdu może spowodować powstawanie wielu niekorzystnych z punktu widzenia ochrony pojazdu zjawisk. Przy zastosowaniu granicznej wartości ładunku może nastąpić przewrócenie pojazdu lub podrzucenie go.

Praca powstała przy wsparciu Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu badawczo-rozwojowego DOB-BiO/ 001/05/2014.

#### LITERATURA

1. AEP-55, Volume 2 for mine threat (Edition 1). Procedure for evaluating the protection level of logistic and light armoured vehicles, NATO/PfP Unclassified publication 2006. AEP 55, Wydawnictwo NATO,
2. Barnat W. Badania symulacyjne pojazdów wojskowych. Wydawnictwo Wojskowego Instytutu Techniki Inżynieryjnej we Wrocławiu 2014; 241-269.
3. Barnat W. Numerical and experimental investigation on internal membrane pressure wave inside sealed structure. Bulletin of the Polish Academy of Sciences – Technical Sciences 2013; 61, 3; 613-621
4. Barnat W. Wybrane zagadnienia ochrony życia i zdrowia załóg pojazdów przed wybuchem. Military Rok 2011.
5. Barnat W., Nawrat A. The influence the location of large charge on behaviour special vehicles SHIBA and AV (Armoured Vehicle). Studies in Systems, Decision and Control 2, Innovative Control Systems for Tracked Vehicle Platforms, Aleksander M. Nawrat (ed.). Wyd. Springer 2014.
6. Grzegorzewski J. Przyśpieszenia, przeciążenia, nieważkość. Wydawnictwo MON 1964.
7. Krzystała E., Kciuk S., Mężyk A. Identyfikacja zagrożeń załogi pojazdów specjalnych podczas wybuchu, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji 2012.
8. LS DYNA MANUAL 2010.
9. Patrick L., Kroell C., Mertz H. Forces on the human body in simulated crashes. Proceedings of the 9th Stapp Car Crash Conference. Society of Automotive Engineers. Warrendale 1965.

- 10 Koczyński A., Rusiński E., Bezpieczeństwo bierne, pochłanianie energii przez profile cienkościennie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010.
11. Test Methodology for Protection of Vehicle Occupants against Anti-Vehicular Landmine Effects. Wydawnictwo RTO/NATO 2007.
12. Tejszerska D. Świtoński E., Gzik M. Biomechanika narządu ruchu człowieka. Instytut Technologii Eksploatacji PIB 2011.
13. Wieremieew. J. Miny wczoraj i jutro. Wydawnictwo Współczesna Szkoła Mińsk 2008.
14. Baskin T.W., Holcomb J.B., Bombs, mines, blast, fragmentation, and thermobaric mechanisms of injury, [in] Mahoney F.P., Ryan J.P., Brooks A.J., Schwab C.W.(ed.): Ballistic trauma. A practical guide. Secondo edition, ©2005 Springer-Verlag London Limited, 45-66.
15. Jamroziak K., Kosobudzki M., Ptak J., Assessment of the comfort of passenger transport in special purpose vehicles. Ekspolatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2013,15(1): 25-30.
16. Rusiński E., Koziółek S., Jamroziak K., Quality assurance method for the design and manufacturing process of armoured vehicles. Ekspolatacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability 2009; 3(43): 70-77.
17. Pryor J.P., Cotton B., Neck Injury. [in] Mahoney F.P., Ryan J.P., Brooks A.J., Schwab C.W.(ed.): Ballistic trauma. A practical guide. Secondo edition, ©2005 Springer-Verlag London Limited, 209-240.