ISSN 1230-3801

Zeszyt 139 nr 3/2016, str. 23 - 37
Volume 139 No 3/2016, pp. 23 - 37

ANALIZA NUMERYCZNA EFEKTYWNOŚCI SIATKOWYCH SYSTEMÓW OCHRONY POJAZDÓW PRZED POCISKAMI KUMULACYJNYMI

NUMERICAL ANALYSIS OF EFFECTIVENESS FOR VEHICLE NET SYSTEMS PROTECTING AGAINST SHAPED CHARGE PROJECTILES

Paweł ŻOCHOWSKI, Paweł PODGÓRZAK
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia,
Military Institute of Armament Technology

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę skuteczności dwóch typów systemów siatkowych chroniących pojazdy przed pociskami z głowicą kumulacyjną. Zbudowano modele numeryczne pocisku PG7-WM i systemów ekranów siatkowych, które użyto do wykonania symulacji penetracji ekranu przez pocisk. Za pomocą analiz numerycznych wyznaczono maksymalną odległość od osi pocisku na kierunku promieniowym, w której powinno dojść do kontaktu pocisku z elementami ekranów w celu jego neutralizacji. Wyznaczone odległości użyto do obliczenia prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku przez systemy siatkowe. Obliczenia wykonano dla kątów elewacji i azymutu w zakresie $\alpha = 0 \div 45°$. Wyliczone w taki sposób wartości posłużyły do sporządzenia wykresów przedstawiających zależności prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku PG-7WM od rozmiaru oczka w przypadku obu typów systemów siatkowych oraz zależność prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku PG-7WM od kątów elewacji i azymutu w przypadku różnych rozmiarów oczek obu typów systemów siatkowych. Wyniki mogą zostać wykorzystane do optymalizacji geometrii systemów siatkowych pod kątem efektywności neutralizacji pocisków.

Słowa kluczowe: mechanika, symulacje numeryczne, systemy siatkowe, pocisk PG7-WM

Abstract. Analysis of effectiveness of two types of net systems protecting vehicles against projectiles with cumulative (shaped charge) warhead is presented in the article. Numerical models of net screens and PG7-WM projectile were created to simulate projectile penetration into the screen. Numerical analyses were used to determine a maximal distance in radial direction from projectile axis for which screen elements should come into contact with the projectile to neutralize it. Determined distances were used to calculate the probability of neutralization of projectiles by net systems. Calculations were performed for elevation and azimuth angles of $\alpha = 0 \div 45°$. The values calculated in such way were used to make graphs of PG-7WM projectile neutralization probability for both types of net systems in function of mesh size and azimuth and elevation angles at various mesh sizes. Received results may be used to optimize geometries of net systems to increase effectiveness of projectile neutralization.

Keywords: mechanics, numerical simulations, net systems, PG-7WM projectile

1. Wstęp

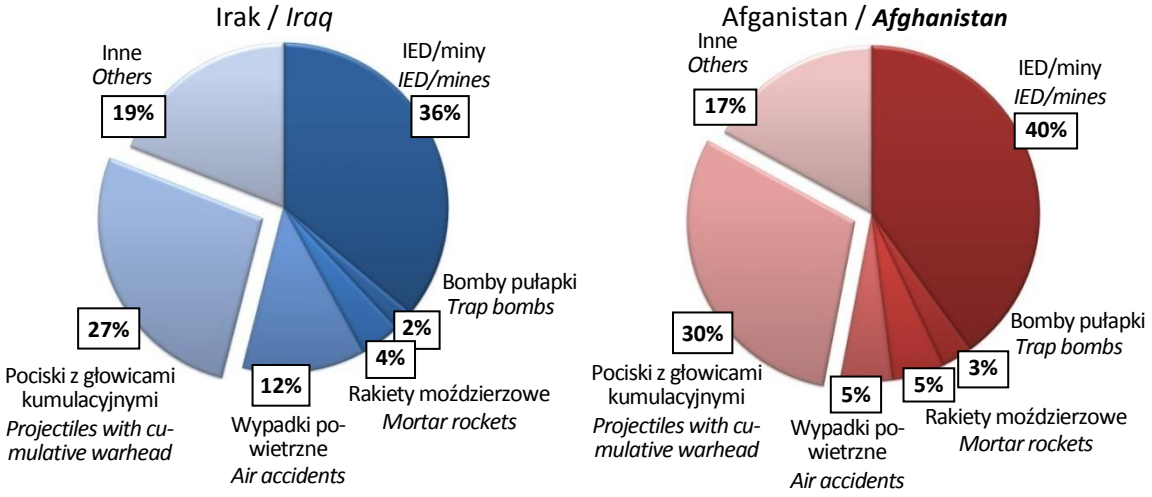
Ręczny granatnik przeciwpancerny RPG-7 jest jednym z najczęściej stosowanych systemów broni na świecie Jego popularność wynika z korzystnego stosunku efektywności niszczenia celów opancerzonych(w zależności od

1. Introduction

Portable antitank rocket propelled grenade launcher RPG-7 is one of the most commonly used weapon systems in the world. It is caused by a beneficial relation between the effectiveness of destruction of

stosowanego pocisku zdolność przebicia stali pancernej RHA wynosi 200÷900 mm do jednostkowego kosztu produkcji. Zalety takie jak prostota konstrukcji, niezawodność, efektywność oraz łatwa obsługa nie wymagająca długotrwałego przeszkolenia sprawiły, że RPG-7 zyskał uznanie i popularność również wśród różnego rodzaju organizacji terrorystycznych i armii partyzanckich na całym świecie. RPG-7 są obecnie jednym z podstawowych zagrożeń dla żołnierzy koalicji na terenie Iraku i w Afganistanie. Według statystyk, w misjach tych drugą pod względem częstości występowania przyczyną śmierci żołnierzy są obrażenia od odłamków ogniowych powstałych w wyniku ostrzelania.

armoured targets (depending on the type of projectile the penetration capability of steel armour RHA is 200÷900 mm) to cost of production. Due to advantages such as simplicity of design, reliability, effectiveness and simple handling without long training the RPG-7 became also acclaimed by various terrorist organizations and guerrilla forces around the world. RPG-7 is now one of the main threats for coalition soldiers in Iraq and Afghanistan. According to statistics the injuries caused by fragments created in the result of firing are the second most frequent reason of death casualties in these missions.



Rys. 1. Przyczyny śmierci żołnierzy w misjach stabilizacyjnych w Iraku i w Afganistanie w latach 2001÷2010

Fig. 1. Reasons of death casualties for soldiers during the missions in Iraq and Afghanistan in 2001÷2010

Wysoka efektywność RPG-7 wynika z charakterystyki wystrzeliwanych z niego pocisków, które wyposażone są w głowicę kumulacyjną. W pociskach tego typu w wyniku detonacji materiału wybuchowego formowany jest strumień kumulacyjny ciekłego metalu poruszający się z prędkością 5÷10 km/s. Ze względu na wysoką efektywność pocisków z głowicą kumulacyjną oraz ich powszechne zastosowanie istotne jest opracowanie skutecznej ochrony przed oddziaływaniem z ich strony. Do ochrony przed pociskami z głowicą kumulacyjną stosuje się cztery główne typy pancerzy:

– aktywne systemy obrony - czujniki monitorują otoczenie ochranianego obiektu. Po

High effectiveness of RPG-7 results from the characteristics of fired projectiles containing cumulative warheads. In such projectiles detonation of a shaped explosive charge generates a cumulative jet of liquid metal moving with the velocity of 5÷10 km/s. Due to high effectiveness of projectiles with cumulative warhead and their wide use it is important to develop effective protection against them. Four main types of armours are used to protect against projectiles containing cumulative warheads:

– Active defence systems – sensors are used to monitor the surroundings of protected object. After detection of an

wykryciu nadlatującego pocisku system miota własne antypociski w celu jego neutralizacji w pewnej odległości od ochranianego obiektu, np. Arena (Rosja), Iron Fist (Izrael);

- reaktywne - zawierają materiał wybuchowy, który detonuje w chwili przebijania przez strumień kumulacyjny, co zaburza formowanie strumienia i zmniejsza głębokość penetracji pancerza, np. Kaktus (Rosja), ROMOR-A (Wielka Brytania), Blazer (Izrael), ERAWA (Polska);
- pasywne o odpowiedniej grubości – wysokowytrzymałe materiały wyhamowują strumień w objętości pancerza np. pancerze stalowe, ceramiczne, kompozytowe itp.;
- pasywne o odpowiednim ukształtowaniu – ich celem jest niedopuszczenie do uformowania strumienia kumulacyjnego, np. pancerze prętowe, systemy siatkowe: SidePro-LASSO (Szwajcaria), Q-net (Wielka Brytania), itp.

Wadą pancerzy aktywnych i reaktywnych w przypadku ich zadziałania jest rażenie odłamkami żołnierzy znajdujących się w pobliżu atakowanego pojazdu. Między innymi dlatego oraz ze względów ekonomicznych (zbyt wysoki koszt systemu w stosunku do kosztu ochranianego pojazdu) i trakcyjnych (zbyt duży ciężar zmniejszający mobilność ochranianego pojazdu) do ochrony pojazdów nieopancerzonych lub lekko opancerzonych przed pociskami z głowicą kumulacyjną najczęściej stosuje się lekkie i tanie systemy siatkowe.

W artykule przedstawiono analizę numeryczną prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku przez dwa podstawowe typy systemów siatkowych. Celem analiz numerycznych było wyznaczenie maksymalnych odległości od osi pocisku na kierunku promieniowym, w której powinno dojść do kontaktu pocisku z elementami ekranu w celu jego neutralizacji. Odległości te zostały użyte do obliczenia prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku przez ekrany siatkowe.

2. Zasada działania pocisku PG-7WM oraz systemów siatkowych

Pocisk PG-7WM jest zmodernizowaną wersją standardowego pocisku PG-7W o większej

incoming projectile the system shoots its own anti-projectiles in order to neutralize it in some distance from the protected object, e.g. Arena (Russia), Iron Fist (Israel);

- Reactive armours – contain the explosive detonating when cumulative jet penetrates the armour what disrupts the formation of the jet and reduces the armour penetration depth, e.g. Kaktus (Russia), RMOR-A (United Kingdom); Blazer (Israel), ERAWA (Poland);
- Passive armours of appropriate thickness – high strength materials slow the shaped charge jet in volume of armour, e.g. steel, ceramic and composite armours, etc.;
- Passive armours of appropriate shape - their aim is to prevent the formation of a shaped charge jet, e.g. rod armours, net systems: SidePro-LASSO (Switzerland), Q-net (United Kingdom), etc.

A disadvantage of active and reactive armours is that after activation the fragments may hit infantry troops in the vicinity of an attacked vehicle. Because of that and also for the economic (cost of the system is higher than the cost of protected vehicle) and mobility reasons (too great weight decreases the mobility of protected vehicle) the light and cheap net systems are used now mostly to protect unarmoured or light armoured vehicles against projectiles with cumulative warheads.

The numerical analysis of the probability of neutralization of a projectile by two basic types of net systems is presented in the article. The aim of numerical analysis was to determine the maximal radial distance from projectile axis at which screen elements should come into contact with a projectile to neutralize it. These distances were used to calculate probability of neutralization of projectile by the net systems.

2. Principles of Operation of PG-7WM Projectile and Net Systems

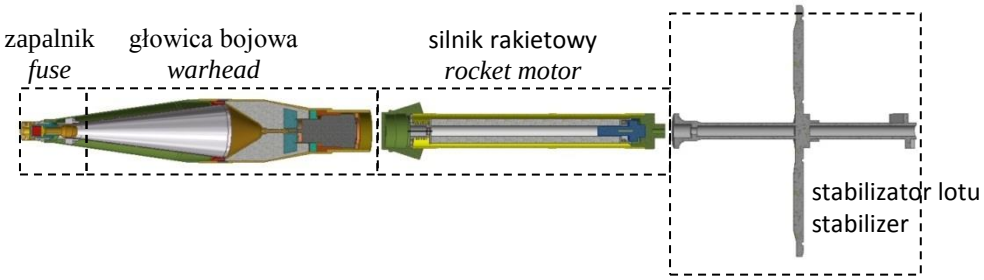
PG-7WM projectile is a modified version of standard PG-7 projectile with in-

przebijalności pancerza (do 330 mm RHA), mniejszym kalibrze (70,5 mm) większej celności i większej prędkości wylotowej. Pocisk składa się z czterech głównych podzespołów (rys. 2).

Uderzenie pocisku w cel powoduje zgniatanie elementu piezoelektrycznego znajdującego się w głowicowej części zapalnika. W ten sposób generowany jest impuls elektryczny. W pocisku występują dwa obwody elektryczne: zewnętrzny (rys. 3 zaznaczony kolorem niebieskim) i wewnętrzny (rys. 3 zaznaczony kolorem czerwonym). Impuls elektryczny jest przekazywany obwodem wewnętrznym do dennej części zapalnika i następuje detonacja materiału wybuchowego. Powstaje fala ciśnienia, która oddziałuje na materiał wkładki kumulacyjnej i powoduje uformowanie strumienia kumulacyjnego. Strumień kumulacyjny ma postać ciekłego metalu i porusza się z prędkością 5÷10 km/s.

creased armour perforation (up to 330 mm RHA), smaller diameter (70.5 mm), greater accuracy and increased muzzle velocity. The projectile consists of four main components (Fig. 2).

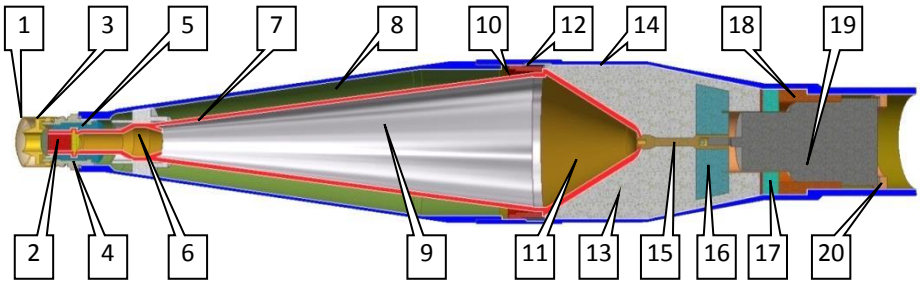
When the projectile hits a target the piezoelectric element located in fuse head part is compressed. In this way an electrical impulse is generated. There are two electrical circuits in projectile: external (Fig. 3 blue colour) and internal (Fig. 3 red colour). The electrical impulse is transmitted by the internal circuit to the bottom part of the fuse and the explosive detonates. It generates a pressure wave acting on the liner material of the shaped charge that forms a cumulative jet. The jet has a form of liquid metal and moves with speed of 5 ÷ 10 km/sec.



Rys. 2. Schemat pocisku PG-7WM /
Fig. 2. Outline of PG-7WM projectile

Ekrany siatkowe (rys. 4) montowane są w odległości ok. 30÷50 cm od powierzchni ochranianego pojazdu. Ich zadaniem jest niedopuszczenie do uformowania się strumienia kumulacyjnego poprzez realizację dwóch mechanizmów. Pierwszy mechanizm polega na zdeformowaniu czepca balistycznego (8) przez elementy siatki w taki sposób, aby zetknął się on ze stożkiem przewodzącym (9). Powoduje to zwarcie w obwodzie zapalnika pocisku, dzięki czemu nie następuje detonacja materiału wybuchowego (13). Drugi mechanizm polega na zdeformowaniu wkładki kumulacyjnej (11) i materiału wybuchowego (13) w pocisku.

Net screens (Fig. 4) are fixed at a distance of ca. 30 ÷ 50 cm from the surface of protected vehicle. Their task is to prevent the formation of a shaped charge jet by exploiting two mechanisms. In the first mechanism the net elements deform the ballistic cap (8) in such way that it comes into contact with the conductive cone (9). This causes the projectile fuse circuit is short-circuited and in consequence there is no detonation of explosive (13). The second mechanism deforms the shaped charge liner (11) and explosive (13) in the projectile.



Rys. 3. Przekrój głowicy pocisku PG-7WM: 1 - przesłona zapalnika, 2 - piezoelement 3 nakrętka, 4 - izolator, 5 - kadłub zapalnika, 6 - styk, 7 - tulejka izolacyjna, 8 - czepiec, 9 - stożek przewodzący, 10 - pierścień dociskający, 11 - wkładka kumulacyjna,12 - pierścień izolujący, 13 - materiał wybuchowy, 14 - korpus głowicy, 15 - przewodnik, 16 - przesłona, 17 - izolator, 18 - tulejka, 19 - denna część zapalnika, 20 - pierścień dociskający

Fig. 3. Cross-section of the warhead of PG-7WM projectile: *1 – Fuse cover, 2 – Piezoelectric element, 3 -Nut, 4 - Isolator, 5 – Fuse body, 6 - Joint, 7 – Isolator sleeve, 8 – Ballistic cap, 9 – Conductive cone, 10 – Locking ring, 11 – Shaped charge liner, 12 – Isolating ring, 13 - Explosive, 14 – Warhead body, 15 - Conductor, 16 - Cover, 17 - Isolator, 18 - Sleeve, 19 – Bottom part of the fuse, 20 – Locking ring*

Skuteczność pocisku z głowicą kumulacyjną jest ściśle uzależniona od precyzji jego wykonania. Maksymalną przebijalność mają pociski, w których odchyłki wymiarów wkładki kumulacyjnej i sprasowanego materiału wybuchowego ≤ 0,05 mm, a odchyłka promieniowa wkładki ≤ 0,03 mm. Wraz ze wzrostem niedokładności wykonania lub montażu elementów pocisku zmniejsza się zdolność penetracji pancerza przez strumień kumulacyjny.

Precision of cumulative warhead projectile workmanship decides about its effectiveness. Maximal penetration have projectiles with dimensional tolerances of shaped charge liner and pressed explosive ≤ 0.05 mm and radial tolerance ≤ 0.03 mm. Shaped charge jet armour penetration capability decreases with an increase of inaccuracies at production or assembly of projectile components.

a b c

Rys. 4. Przykładowe typy systemów siatkowych: a - Tarian® firmy Amsafe Bridport **[7]**, b - Q-net firmy Qinetiq **[8]**, c - SidePro-LASSO firmy Ruag (Szwajcaria) **[9]**

Fig. 4. Examples of net protection systems: *a - Tarian® made by Amsafe Bridport **[7]**, b - Q-net made by Qinetiq **[8]**, c - SidePro-LASSO made by Ruag (Switzerland) **[9]***

W zależności od stopnia deformacji wkładki kumulacyjnej oraz materiału wybuchowego przez elementy ekranu siatkowego podczas penetracji pocisku proces formowania strumienia

Depending on liner and explosive deformation level by net screen components at penetration of the bullet the process of shaped charge jet formation is disturbed

kumulacyjnego będzie zaburzony lub nie wystąpi. Skutki oddziaływania pocisku na pancerz rodzimy pojazdu są wówczas porównywalne z detonacją materiału wybuchowego zawartego w pocisku.

Warunkiem wystąpienia opisanych mechanizmów jest brak kontaktu zapalnika pocisku z elementami struktury systemu ekranów (zapalnik musi przejść przez oczko siatki). Dlatego też podczas projektowania ekranów siatkowych istotna jest optymalizacja ich struktury geometrycznej (rozmiarów oczek) zwiększająca prawdopodobieństwo neutralizacji pocisku.

Prawdopodobieństwo ochrony pojazdów przed pociskami z głowicą kumulacyjną przez systemy siatkowe było już analizowane w literaturze [4], [5].

Jednak w pracach tych autorzy opierali się wyłącznie na obliczeniach analitycznych, nie uwzględniając właściwości materiałów, z których wykonane były ekrany i pocisk (ich wytrzymałości sztywności itp.). Dodatkowo w analizach tych błędnie zakładano, że jakikolwiek kontakt elementów ekranu z pociskiem (wykluczając kontakt z zapalnikiem) zapewnia neutralizację pocisku, podczas gdy w rzeczywistości istnieje pewna graniczna odległość od osi pocisku w kierunku promieniowym, powyżej której w przypadku kontaktu głowicy pocisku z elementami siatek stopień jej deformacji będzie niewystarczający i dojdzie do uformowania strumienia kumulacyjnego. Celem opisanych w artykule analiz numerycznych było między innymi wyznaczenie wspominanej odległości granicznej i uwzględnienie jej podczas obliczania prawdopodobieństwa zadziałania systemów siatkowych.

3. Modele numeryczne ekranów siatkowych

Modele numeryczne ekranów siatkowych przygotowano wzorując się na istniejących rozwiązaniach konstrukcyjnych. Przygotowano modele dwóch systemów. Typ I stanowiła siatka z wysokowytrzymałego drutu stalowego o średnicy 4 mm (rys. 5). Typ II to siatka z linki aramidowej, w której w węzłach krzyżujących się linek zamocowane są elementy stalowe w kształcie graniastosłupa o podstawie sześciokąta (rys. 6).

or interrupted at all. Then the effects of projectile impact on vehicle original armour are comparable with a simple detonation of explosive contained in the projectile.

Described mechanisms may work provided that there is no contact between projectile fuse and elements of net screen structure (fuse has to pass through a mesh). Therefore, during the designing of net screens it is essential to optimize their geometric structure (mesh size) to increase the probability of projectile neutralization.

The probability of neutralization of projectiles with cumulative warhead by the net systems has been already studied in the literature [4], [5].

However, in these works authors relied on analytical calculations only, and they have not considered the properties of materials the screens and projectile were made of (strength, stiffness, etc.). In addition, authors of these analyses wrongly assumed that any contact between the screen and the projectile (excluding contact with fuse) ensures neutralization of the projectile, whereas in practice there is a threshold distance from the projectile axis in the radial direction above which the deformation of the warhead contacting with the components of nets is insufficient and the shaped charge jet is still formed. The objective of numerical analysis described in this article was to determine this limit of distance and to use it in calculation of probability of net systems effective action.

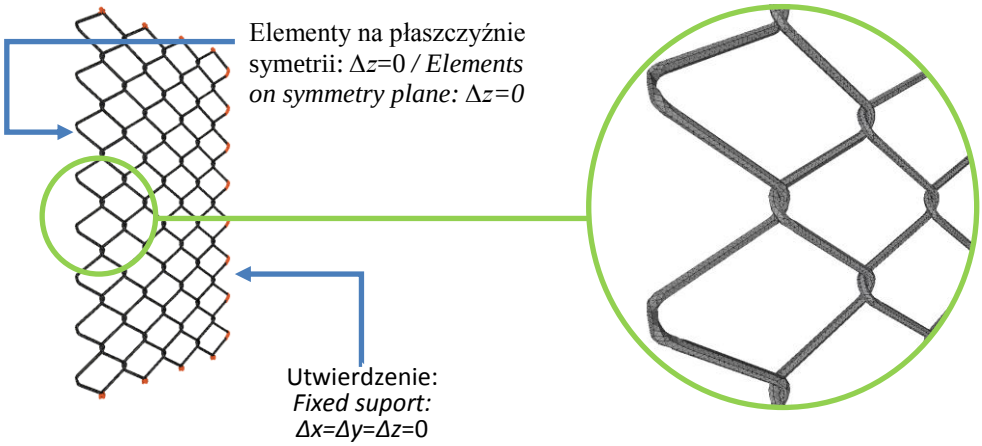
3. Numerical Models of Net Screens

Numerical models of net screens were created in the reference to existing design solutions. Models of two types of systems were created. Type I was a net made of high-strength steel wire with a diameter of 4 mm (Fig. 5). Type II was a net of aramid strings having the nodes with fixed prism shape steel components of hexagonal base (Fig. 6).

For description of steel materials a

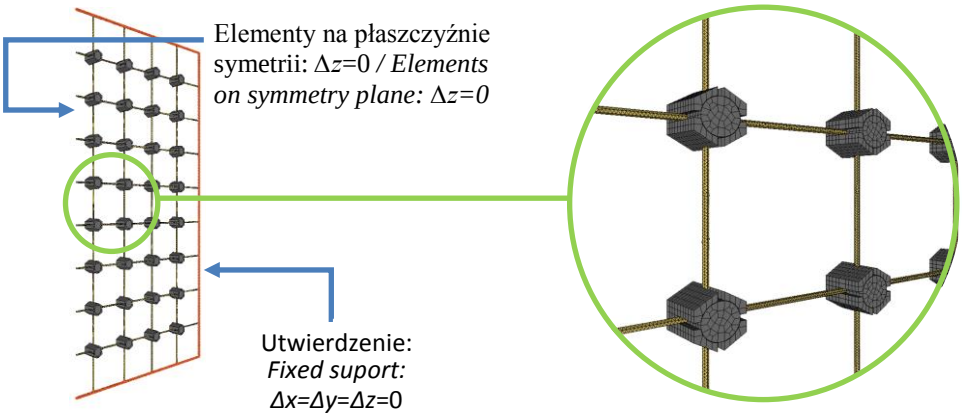
Do opisu zachowania się materiałów stalowych wykorzystano model wytrzymałości oraz model zniszczeń *Johnson-Cook*. Linki aramidowe zamodelowano w sposób uproszczony zakładając, że materiał ma charakterystykę izotropową. Zastosowano model materiałowy *Von Mises* z równaniem stanu *Shock* (*Gruneisen)* oraz modelem zniszczeń *Hydro (Pmin)*.

Johnson-Cook model of strength and failure was used. Aramid strings were movdeled in a simplified manner, assuming that the material has an isotropic character. Von Mises material model with Shock (Gruneisen) equation of state and Hydro (Pmin) failure model were used.



Rys. 5. Model numeryczny ekranu I

***Fig. 5. Numerical model of net screen of type* I**



Rys. 6. Model numeryczny ekranu II

Fig. 6. Numerical model of net screen of type II

W dyskretyzacji przestrzennej zastosowano elementy bryłowe czterowęzłowe (*TETRA*) w przypadku linek, stalowe elementy ekranu zbudowano za pomocą elementów ośmiowęzłowych (*HEX*). Wprowadzono płaszczyznę symetrii, co zmniejszyło liczbę elementów skończonych o połowę. Całkowita liczba elementów, z których zbudowano model numeryczny ekranu typu I w zależności od rozmiaru oczka siatki wyniosła 90000÷110000 elementów skończonych. i przypadku ekranu typu II wyniosła

For spatial discretization of strings solid tetragonal elements (TETRA) were used and steel parts of the screen were built of eight-node solid elements (HEX). The symmetry plane was used what reduced the number of finite elements by 50%. Total number of elements used in numerical models of type I screen depends on the net mesh size and amounts to 90000÷110000 finite elements and in case of type II screen it amounts to

120000÷140000 elementów skończonych.

4. Model numeryczny pocisku

Model numeryczny pocisku PG-7WM przygotowano na podstawie jego dokumentacji technicznej. Model zawiera 38 części, którym przypisano odpowiednie materiały. Do opisu zachowania się materiałów wykorzystano kilka modeli materiałowych dostępnych w programie *ANSYS Autodyn*: m.in. *Johnson-Cook*, *Von Mises*, *Elastic* oraz *Piecewise JC*. Dane do modeli numerycznych zaczerpnięto z literatury oraz z biblioteki materiałów programu *ANSYS Autodyn*.

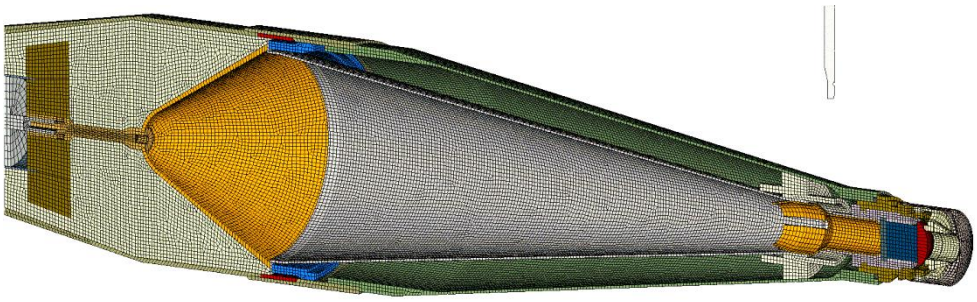
Połączenia pomiędzy częściami realizowane były za pomocą modelu kontaktu typu *Bonded*. Połączenia gwintowane oraz połączenia elementów ulegających odkształceniom zamodelowano za pomocą modelu kontaktu typu *Bonded breakable* z odpowiednimi wartościami sił i naprężeń zrywających połączenie.

120000÷140000 finite elements.

4. Numerical Model of Projectile

A numerical model of PG-7WM projectile was created on the basis of its technical documentation. The model consists of 38 parts to which appropriate materials were assigned. For description of materials a few material models available in ANSYS Autodyn program were used such as: Johnson-Cook, Von Mises, Elastic and Piecewise JC. The data for numerical models was taken from the literature and from the material library of ANSYS Autodyn.

Joints between the parts were performed by *Bonded* model of contact. Threaded joints and joints of parts subjected to deformations were modeled by *Bonded Breakable* model of contact with appropriate values of forces and stresses which break the joint.



Rys. 7. Sposób dyskretyzacji modelu głowicy bojowej pocisku

Fig. 7. Discretization of projectile warhead numerical model

W dyskretyzacji przestrzennej zastosowano elementy bryłowe ośmiowęzłowe (*HEX*) oraz czterowęzłowe (*TETRA*), przy czym udział tych drugich nie przekraczał 2%. Odwzorowując części pocisku ulegające odkształceniom (czepiec, stożek, głowica, wkładka itp.) zastosowano mniejsze elementy skończone. Wprowadzono płaszczyznę symetrii. Ostatecznie model numeryczny pocisku (rys. 7), został zbudowany ze 190991 elementów skończonych.

Pociskowi w analizach nadano prędkość początkową 230 m/s, pominięto prędkość obrotową.

In spatial discretization hexagonal (HEX) and tetragonal (TETRA) volume elements were used and the share of the second ones does not exceed 2%. Parts of projectile subjected to deformations (ballistic cap, cone, warhead, liner, etc.) were modeled with smaller finite elements. The symmetry plane was used. Finally numerical model of projectile (Fig. 7) was built with 190991 finite elements.

In the analysis the projectile had initial velocity of 230 m/s and rotation velocity was omitted.

5. Analizy numeryczne

W programie *ANSYS Autodyn* wykonano symulacje oddziaływania dwóch typów ekranów siatkowych na pocisk PG-7WM. Ich celem było wyznaczenie maksymalnych odległości od osi pocisku w kierunku promieniowym, w której powinno dojść do kontaktu pocisku z elementami siatek w celu jego neutralizacji (wystąpienia zwarcia w układzie zapalnika pocisku lub deformacji wkładki kumulacyjnej i materiału wybuchowego). Interakcje pomiędzy elementami symulacji realizowane były za pomocą procedury opierającej się na funkcji kary (*Penalty*).

Z uwagi na cel analiz numerycznych przyjęto założenie, że podczas symulacji pocisk penetruje zawsze środek oczka siatki. Spośród wszystkich wariantów penetracji, w których nie występuje kontakt zapalnika z elementami ekranu, jest to wariant najbardziej niekorzystny dla systemu ochrony gdyż deformacje głowicy bojowej są wówczas najmniejsze. Poprawne zadziałanie ekranu podczas penetracji pocisku w środek oczka zapewnia, że system spełni swoją funkcję również przy każdym innym miejscu trafienia, podczas którego zapalnik nie zetknie się z elementami ekranu.

Wykonano wiele analiz numerycznych, w czasie których zmiennymi parametrami były:

- rozmiar oczek siatki – zmieniany był w zakresie od średnicy zewnętrznej pocisku (70,5 mm) aż do maksymalnego rozmiaru siatki oczka zapewniającego neutralizację pocisku;
- kąt elewacji oraz kąt azymutu pocisku (nachylenia pocisku względem płaszczyzny siatki) – zmieniany był w zakresie od prostopadłej penetracji pocisku w ekran (kąty 0°) do penetracji pod kątami 45°.

Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe wyniki analiz numerycznych, podczas których oceniano stopień deformacji głowicy bojowej penetrującego ekran pocisku. Przedstawiono deformacje siatki i głowicy pocisku w wybranych chwilach czasowych podczas penetracji ekranu. Rozmiar oczka siatki ekranu wariantu I wynosił 55,5 mm, a ekranu wariantu II 56,5 mm. Rozmiary te były maksymalnymi, przy których zaobserwowano wystąpienie któregokolwiek z mechanizmów neutralizacji pocisku.

5. Numerical Analyses

Simulations of reaction of two types of net screens into PG-7WM projectile were made by using *ANSYS Autodyn* program. They were aimed to determine maximal radial distances from projectile axis in which the projectile should come into contact with net elements in order to be neutralized (occurrence of short circuit in the fuse circuit or deformation of shaped charge liner and explosive). Interactions between the elements of simulation were performed by using a procedure based on the “Penalty” function.

Due to the purpose of numerical analyses it was assumed that during the simulation a projectile always penetrates the net mesh center. From all possible penetration scenarios, where there is no contact between the fuse and elements of screen, it is the most unfavorable option for the protecting system as warhead deformations are the lowest ones. Proper functioning of the screen when the center of the mesh is penetrated by a projectile means that for each other point of hitting the system will fulfill its function provided that there is no contact between the fuse and the screen elements.

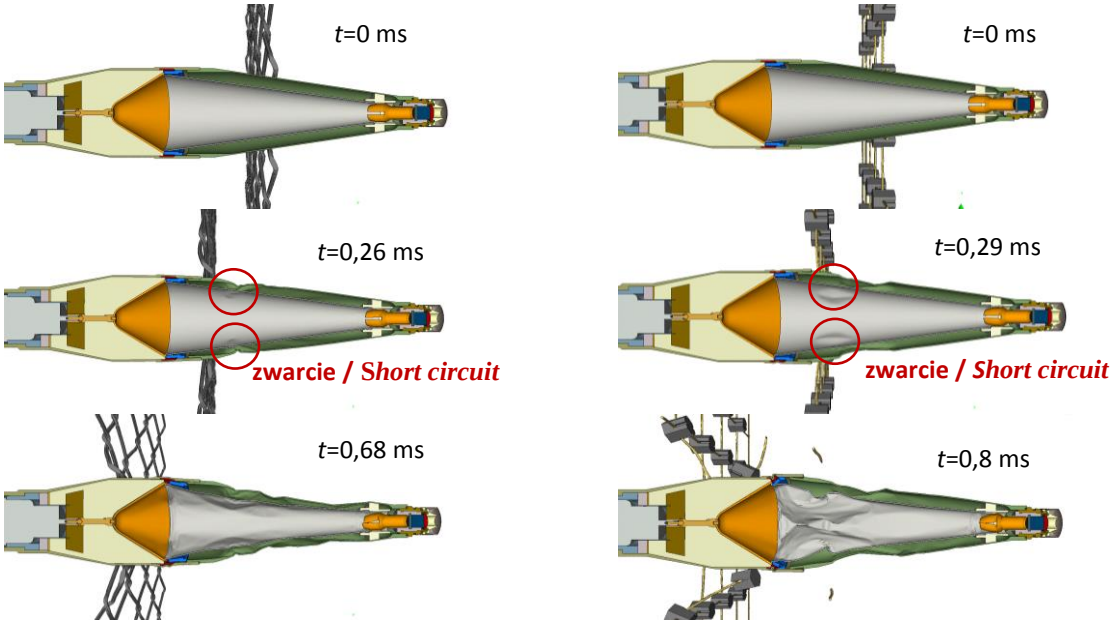
A lot of numerical analyses were carried out at following variable parameters:

- the size of net mesh was changed from the outer diameter of projectile (70.5 mm) up to the maximum size of net mesh which ensured neutralization of the projectile;
- elevation and azimuth angles of the projectile (projectile inclination against net surface) were changed from the perpendicular penetration of the projectile into the screen (angle of 0°) to penetration at 45° angle.

Figure 8 shows an example of results of numerical analyzes during which the level of deformation of screen penetrating projectile warhead was evaluated. Deformations of net and projectile warhead are presented for different moments of time during screen penetration. The net mesh size for the screen of type I was 55.5 mm, and for the screen of type II was 56.5 mm. These sizes were maximal at which at least one mechanism of projectile neutralization was observed.

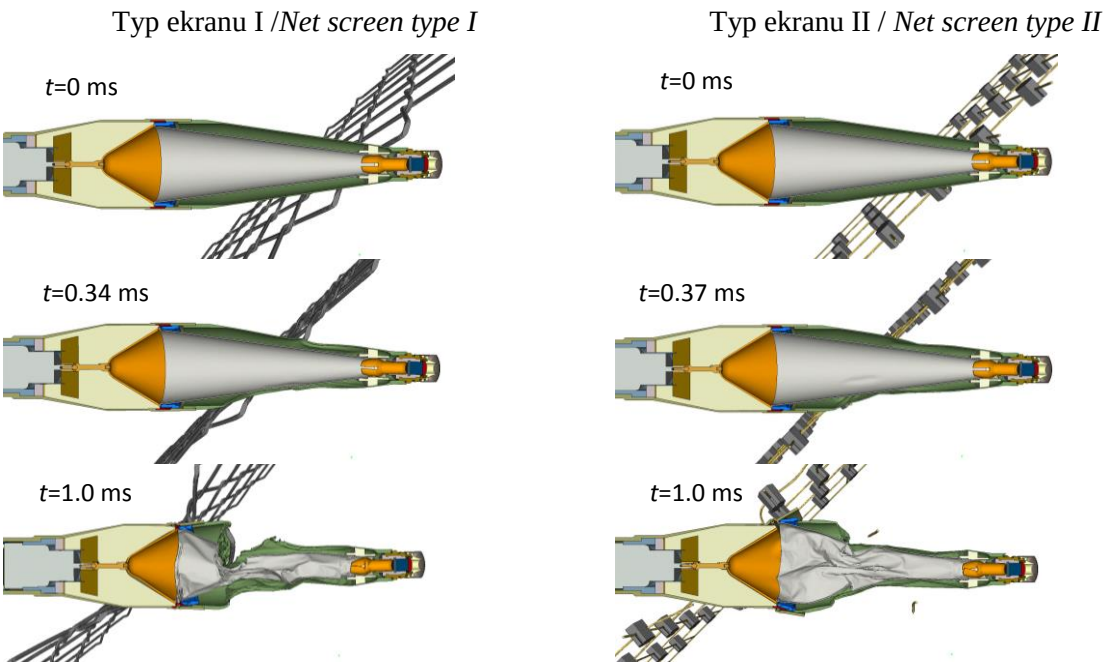
Typ ekranu I/ *Net screen type I*

Typ ekranu II / *Net screen type II*



Rys. 8. Deformacje ekranów i głowicy pocisku PG-7WM w wybranych chwilach czasowych podczas prostopadłej penetracji w ekrany siatkowe

Fig. 8. Deformations of screens and PG-7WM projectile warhead in chosen moments of time during the perpendicular penetration into net screens



Rys. 9. Deformacje ekranów i głowicy pocisku PG-7WM w wybranych chwilach czasowych podczas penetracji pod kątem 45° w elewacji w ekrany siatkowe

Fig. 9. Deformations of screens and PG-7WM projectile warhead in chosen moments of time during the penetration into the net screens at elevation angle 45°

Promienie okręgów wpisanych w wyznaczone maksymalne rozmiary oczek siatek ekranów stanowiły szukane maksymalne odległości od osi pocisku w kierunku promieniowym, w których powinno dojść do kontaktu pocisku z elementami ekranu w celu jego neutralizacji.

The radii of circles inscribed in the determined maximal sizes of net meshes of screens were the searched maximal radial distances from projectile axis at which the projectile had to contact with screen elements in order to become neutralized. The

Wyznaczone maksymalne odległości zostały użyte do obliczenia prawdopodobieństwa ochrony systemów siatkowych.

W przypadku wzrostu kątów elewacji i azymutu wzrasta również stopień deformacji głowicy bojowej atakującego pocisku w wyniku zmniejszenia obserwowanego z punktu widzenia nadlatującego pocisku prześwitu oczek siatek. Niestety wzrasta również ryzyko kontaktu zapalnika z elementami ekranu i uformowania się strumienia kumulacyjnego (rys. 9).

6. Obliczenia prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku przez systemy ekranów siatkowych

Dotychczasowe analizy prawdopodobieństwa ochrony systemów ekranów siatkowych przed pociskami z głowicą kumulacyjną [4], [5] opierały się wyłącznie na obliczeniach analitycznych, nie biorąc pod uwagę właściwości materiałów, z których wykonane są ekrany i pocisk (wzajemnej relacji ich wytrzymałości, sztywności itp.). W analizach tych zakładano, że jakikolwiek kontakt elementów systemu z pociskiem (wykluczając kontakt z zapalnikiem) zapewnia neutralizację pocisku.

Przeprowadzone analizy numeryczne wykazały, że aby zapewnić neutralizację pocisku PG-7WM do kontaktu elementów ekranu siatkowego z pociskiem musi dojść w odległości nie większej niż 27,75 mm – ekran typu I, oraz 28,25 mm – ekran typu II, od osi pocisku w kierunku promieniowym. Zatem średnice brane pod uwagę podczas obliczania prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku PG7-WM nie są równe 70,5 mm (średnica pocisku), ale wynoszą D_{maxI} = 55,5 mm oraz D_{maxII} = 56,5 mm odpowiednio w przypadku ekranów typu I i II.

Sposób obliczania prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku przez ekran siatkowy przedstawiono schematycznie na rysunku 10, gdzie kolorem zielonym zaznaczono miejsca penetracji pocisku, w przypadku, których dojdzie do jego neutralizacji, kolorem czerwonym natomiast miejsca penetracji pocisku, w przypadku których dojdzie do kontaktu zapalnika z ekranem (zewnętrzny czerwony obszar) lub deformacje pocisku będą niewystarczające do jego neutralizacji (wewnętrzny czerwony ob-

determined maximum distances were used to calculate the probability of protection by the net systems.

With the increase of azimuth and elevation angles the deformation level of attacking projectile warhead also increases as a result of decreased clearance for net meshes observed from the incoming projectile. Unfortunately the risk of contact between the fuse and elements of screen increases both with a possibility of forming the shaped charge jet (Fig. 9).

6. Calculation of Probability of Neutralization of Projectile by Net Screen Systems

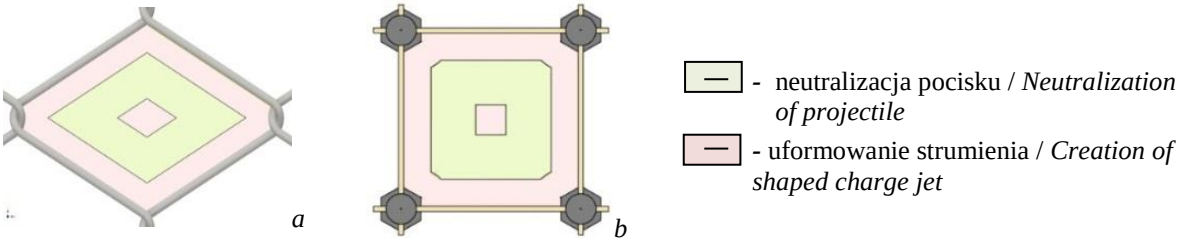
Previous analyses of probability of protection against shaped charge head projectiles by net screen systems [4], [5] were based only on analytical calculations without any consideration of properties (strength, stiffness, etc.) of materials the screens and a projectile are made of. It was assumed in these analyzes that any contact between the system elements and projectile (except of fuse) ensured the neutralization of the projectile.

Performed numerical analyses have proved that PG-7WM projectile neutralization requires the net screen elements should come into contact with the projectile at radial distances smaller than 27.75 mm – net screen of type I, and 28.25 mm – net screen of type II measured from projectile axis. So the diameters taken into account at calculating the probability of the PG7-WM projectile neutralization are not equal to 70.5 mm (projectile diameter) but D_{maxI} = 55.5 mm and D_{maxII} = 56.5 mm for screen types I and II respectively.

A method of calculation of the probability of projectile neutralization by the net screen is shown schematically in Figure 10, where with the green colour are marked the points of projectile penetration for which it will be neutralized and with the red colour are marked the points of projectile penetration for which the fuse will come into contact with the screen (external red area) or deformations of the projectile will be insufficient to

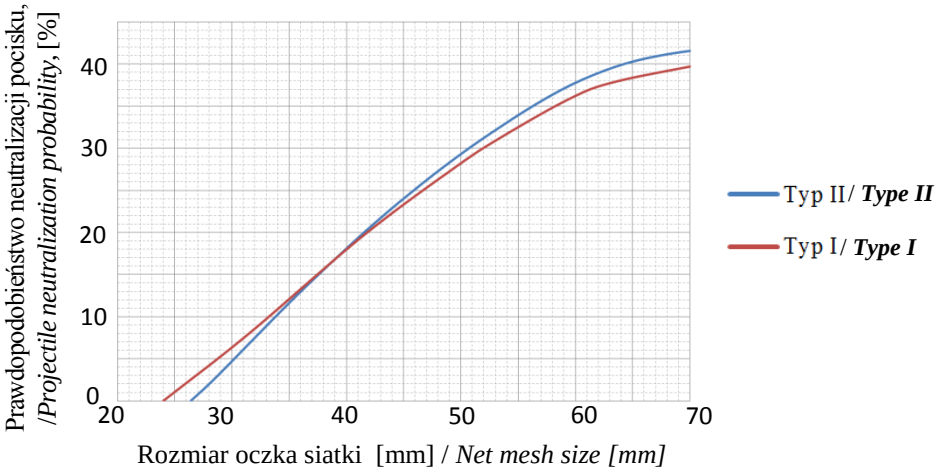
szar). Prawdopodobieństwo neutralizacji pocisku obliczano, jako stosunek powierzchni oczka w przypadku, której atakujący pocisk zostanie zneutralizowany do całkowitej powierzchni oczka.

neutralize it (inner red area). The probability of projectile neutralization is calculated as the proportion of mesh area that neutralizes the attacking projectile to the total area of the mesh.



Rys. 10. Sposób obliczania prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku przez ekran siatkowy w przypadku penetracji prostopadłej: a – typ I, b – typ II

Fig. 10. A method of calculation of the probability of projectile neutralization by net screens in case of perpendicular penetration: a – Type I, b – Type II



Rys. 11. Zależność prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku PG-7WM od rozmiaru oczka obu typów ekranów siatkowych

Fig. 11. The graph of probability of PG-7WM projectile neutralization in function of net mesh size for both types of net screens

Na podstawie obliczonych w taki sposób wartości sporządzono wykresy zależności prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku PG-7WM od rozmiaru oczka obu typów ekranów siatkowych (rys. 11) oraz zależności prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku PG-7WM od kąta elewacji, kąta azymutu (rys.12÷13) oraz jednocześnie kąta elewacji i azymutu (rys. 14) dla różnych rozmiarów oczek obu typów ekranów siatkowych.

7. Podsumowanie

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że podczas penetracji prostopadłych skuteczność ekranów siatkowych

The values calculated in such way were used to make the graph of probability of PG-7WM projectile neutralization in function of mesh size for both types of net screens (fig. 11) and the graph of probability of PG-7WM projectile neutralization in function of elevation and azimuth (fig. 12, 13) angles and in function of combined azimuth and elevation angles (fig. 14) for various mesh sizes of both types of net screens.

7. Summary

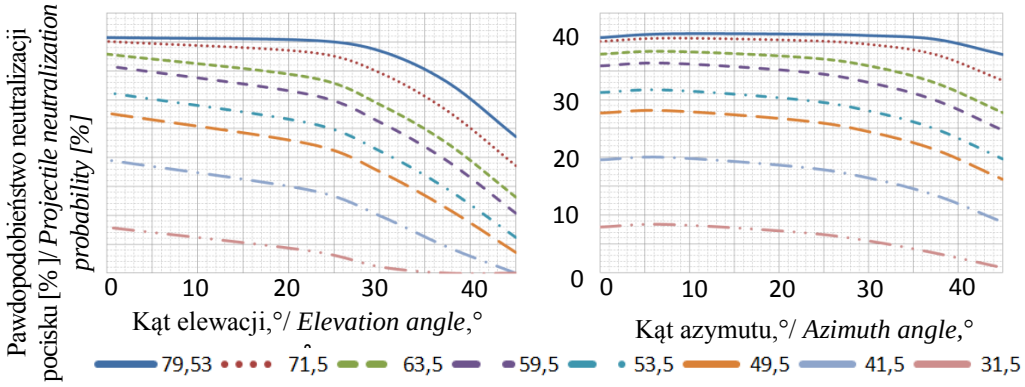
Basing on received results it can be stated that at perpendicular penetrations the effectiveness of net screens of type II is

typu II jest nieznacznie (około 2 %) wyższa niż typu I dla rozmiarów oczek>40 mm. Wraz ze wzrostem kątów elewacji i azymutu skuteczność ekranów typu II obniża się jednak intensywniej niż typu I.

Maksymalne prawdopodobieństwo neutralizacji pocisku PG-7WM (około 40%) występuje w przypadku rozmiarów oczek 70,5 mm równym średnicy pocisku. W przypadku tym istnieje jednak ryzyko wynoszące 4 % oraz 3 % odpowiednio dla typu I i II, że pocisk przejdzie nieuszkodzony przez ekran siatkowy i zadziała na powierzchni pojazdu.

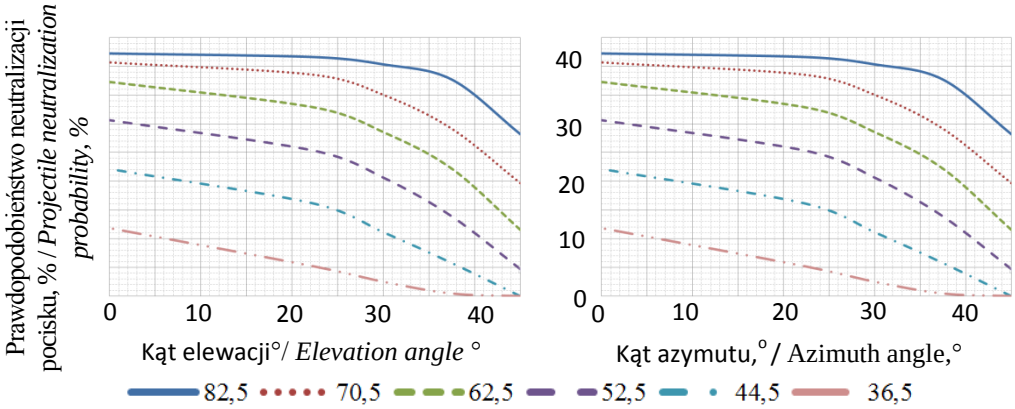
slightly higher than of type I (ca. 2 %) for mesh sizes > 40 mm. But the effectiveness of net screens of type II decreases faster than type I with the increase of elevation and azimuth angles.

Maximum probability of neutralization of the PG-7WM projectile (ca. 40 %) is at mesh size of 70.5 mm equaling to projectile diameter. But in this case there is a risk of 4% for type I and 3% for type II that the projectile passes through the net screen undamaged and activates on the vehicle surface.



Rys. 12. Zależność prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku PG-7WM od kąta elewacji i kąta azymutu dla różnych rozmiarów oczek ekranu siatkowego typu I

Fig. 12. The graph of probability of PG-7WM projectile neutralization in function of the azimuth and elevation angles for various net mesh sizes of net screen of type I



Rys. 13. Zależność prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku PG-7WM od kąta elewacji i kąta azymutu dla różnych rozmiarów oczek ekranu siatkowego typu II

Fig. 13. The graph of probability of PG-7WM projectile neutralization in function of the azimuth and elevation angles for various mesh sizes of type II net screen

Maksymalne rozmiary oczek ekranów siatkowych, przy których nie ma ryzyka przejścia nieuszkodzonego pocisku przez ekran wynoszą 55,5 mm dla typu I (33% szans na neutralizację pocisku przy penetracji prostopadłej) oraz 56,5 mm dla typu II (34% szans na neutralizację po-

Maximal sizes of net screen meshes, without any risk that undamaged projectile passes the screen, are 55.5 mm for type I screen (33% chance to neutralize projectile at perpendicular penetration) and 56.5 mm for type II screen (34% chance to neu-

cisku przy penetracji prostopadłej).

Z informacji literaturowych wynika, że przebijalność strumienia kumulacyjnego zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości pomiędzy punktem detonacji a przebijanym obiektem [[2] (gdy odległość ta wynosi 80 cm przebijalność pancerza jest mniejsza o połowę). Dlatego biorąc pod uwagę fizykę zjawiska, korzystniejsze jest zdetonowanie pocisku i uformowanie strumienia kumulacyjnego na elementach odsuniętego ekranu niż na powierzchni pojazdu.

Na podstawie otrzymanych wyników analiz należy stwierdzić, że dobór optymalnego rozmiaru oczka siatki nie jest jednoznaczny i należy brać pod uwagę dodatkowe aspekty takie jak:

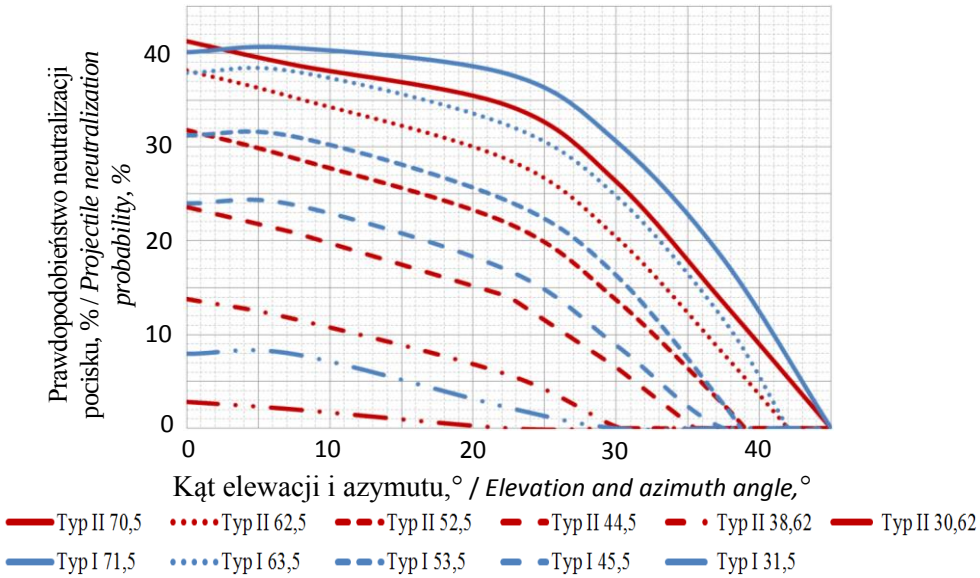
- analiza ukształtowania terenu, w którym znajdować się będzie ochraniany pojazd;
- analiza charakteru zagrożeń pod względem typów pocisków wykorzystywanych przez wrogie jednostki.

tralize projectile at perpendicular penetration).

According to literature the penetration of shaped charge jet decreases when the distance between the point of detonation and the perforated object increases [2] (for distance of 80 cm the penetration of armour decreases two times). Therefore taking into consideration the physics of the phenomenon it is better to detonate a projectile and start formation of shaped charge jet on components of an off screen than on vehicle surface.

Basing on received results of analyses it has to be stated that selection of an optimal size of net mesh is ambiguous and following aspects have to be considered:

- Analysis of terrain profiles where the protected vehicle operates;
- Analysis of threat characteristics regarding types of projectiles used by enemy units.



Rys. 14. Zależność prawdopodobieństwa neutralizacji pocisku PG-7WM od jednoczesnego wzrostu kątów elewacji i azymutu dla różnych rozmiarów oczek obu typów ekranów siatkowych

Fig. 14. The graph of probability of PG-7WM projectile neutralization in function of simultaneous increase of azimuth and elevation angles for various mesh sizes of both types of net screens

Na terenach płaskich przeważać będą ataki pocisków z niewielkich kątów elewacji i wówczas rozmiar oczek siatki może być mniejszy. Na terenach zurbanizowanych, mogą wystąpić ataki z kondygnacji budynków, rozmiar oczek siatek powinien być większy (większy prześwit siatki przy jej nachyleniu).

On the flat areas attacks of projectiles at low elevation angles will prevail and the size of net meshes may be smaller. In urban areas attacks from higher storeys of buildings may occur and the size of net meshes has to be larger (greater clearance of inclined net).

Istotnym parametrem mającym wpływ na optymalny rozmiar oczka siatki systemu ochrony jest geometria atakującego pocisku, przede wszystkim stosunek średnicy czołowej części zapalnika do średnicy głowicy pocisku. W artykule przeprowadzone były analizy ataku pocisku PG-7WM o średnicy głowicy 70,5 mm i średnicy zapalnika WP-7 21,4 mm. Standardowy pocisk wystrzeliwany z granatnika RPG-7 ma ten sam zapalnik, ale większą średnicę głowicy (np. pocisk PG-7W - średnica 85 mm; pocisk PG-7WL- średnica 93 mm). Większy stosunek średnicy głowicy pocisku do średnicy zapalnika w standardowych pociskach PG-7 oraz możliwość zastosowania ekranów siatkowych o większym rozmiarze oczek sprawia, że prawdopodobieństwo neutralizacji standardowego pocisku PG-7 jest znacznie wyższe niż pocisku PG-7WM.

An important parameter affecting the optimal size of protecting system net mesh is geometry of attacking projectile and especially a ratio between diameters of fuse front part and projectile warhead. The paper analyses attacks of PG-7WM projectile at diameters of warhead 70.5 mm and WP-7 fuse 21.4 mm. A standard projectile fired from a RPG 7 launcher has the same fuse but the warhead diameter is larger (e.g. PG-7W - diameter 85 mm and PG-7WL - diameter 93 mm). Greater ratio of diameters of projectile warhead to the fuse in standard PG-7 projectiles and a possibility of using net screens with bigger meshes provide greater chances of neutralization for standard PG-7 projectile than for PG-7WM projectile.

Literatura / *Literature*

[1] Wiśniewski A. 2001. *Pancerze budowa, projektowanie i badanie*. WNT. Warszawa

[2] Goławski A., Wilewski K. 2009. *Granatołapki,* Polska Zbrojna, nr 47 (669), pp. 22-24

[3] Krzyształa E., Mężyk A., Kciuk S. 2011. *Analiza zagrożenia załogi w wyniku wybuchu ładunku pod kołowym pojazdem opancerzonym*. Zeszyty naukowe WSOWL, Nr 1 (159)

[4] Szudrowicz M. 2011. *Analysis of Bar and Net Screens Structure Protecting Vehicles against Anti-tank Grenades Fired From RPG-7*. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 18, No. 1

[5] Panowicz R., Sybilski K., Niezgoda T., Barnat W. 2011. *Obliczenia analityczne prawdopodobieństwa zadziałania pancerza wykonanego z prętów o przekroju kołowym*. Problemy Techniki Uzbrojenia, R. 40, z. 119, str. 77÷82

[6] www.youtube.com, Ultimate Weapon Firepower – RPG-7, 2016

[7] www.amsafe.com, pancerz Tarian frimyAmsafe Bridport, 2016

[8] www.army-guide.com, pancerz Q-net firmy Qinetiq, 2016

[9] www.armyman.info, pancerz SidePro-LASSO firmy Ruag, 2016